THÈSE

PRÉSENTÉE A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

POUR OBTENIR LE

GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

JEAN-PIERRE BIMOND

Licencié ès Sciences

Ingénieur diplômé de l'E.N.S.C.M.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RÉCUPÉRATION SECONDAIRE D'HUILE DE PÉTROLE PAR INJECTION DE GAZ

Soutenue le 1966 devant la Commission d'Examen.

Jury

MM. J. SALVINIEN — Président

P. VIELES
B. PISTOULET — Assesseurs

THÈSE

PRÉSENTÉE A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

POUR OBTENIR LE

GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

JEAN-PIERRE BIMOND

Licencié ès Sciences

Ingénieur diplômé de l'E.N.S.C.M.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA RÉCUPÉRATION SECONDAIRE D'HUILE DE PÉTROLE PAR INJECTION DE GAZ

Soutenue le devant la Commission d'Examen.

Jury	MM. J. SALVINIEN	Président
	P. VIELES	Assesseurs
	B. PISTOULET	Assesseurs

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

FACULTE DES SCIENCES

DE

MONTPELLIER

LISTE DES PROFESSEURS

DOYEN : B. CHARLES

ASSESSEURS : R. JOUTY - J. FALGUEIRETTES

DOYEN HONORAIRE : P. MATHIAS

PROFESSEURS HONORAIRES : R. JACQUES, E. TURRIERE, J. GRANIER, M. CASTERAS, J. SOULA, M. BOUHET, E. CARRIERE, G. DENIZOT, M. MATHIAS

PROFESSEURS TITULAIRES :

M. MOUSSERON	Chimie Organique
M. L. EMBERGER	Botanique
M. J.P. ROIG	Physique
M. P. CHATELAIN	Minéralogie et Cristallographie
Mlle O. TUZET	Zoologie
Mlle G. CAUQUIL	Chimie
M. G. COUCHET	Mécanique Supérieure
M. J. SALVINIEN	Chimie-Physique
Mlle A.M. VERGNOUX	Physique
M. J. AVIAS	Géologie
M. P. VIELES	Chimie
M. J. RABINOVITCH	Physique (C.S.U.P.)
M. E. KAHANE	Chimie Biologique
M. J.J. MOREAU	Mécanique Rationnelle
M. B. CHARLES	Mathématiques Pures
M. J. MOTTE	Biologie Végétale
M. R. JOUTY	Physique
M. P. DUMONTET	Physique
M. R. LEGENDRE	Zoologie
M. I. ASSENMACHER	Physiologie Animale
M. A. CASADEVALL	Chimie Organique
M.B. PISTOULET	Physique
M. Ch. ROUMIEU	Analyse Supérieure
M. A. POTIER	Chimie Minérale
M. R. LAFONT	Physique
M. R. JACQUIER	Chimie
M. J. FALGUEIRETTES	Minéralogie
Mme J. CHARLES	Mathématiques
M. P. CAILLON	Physique
M. J. ROUZAUD	Chimie
M. Ch. SAUVAGE	Botanique

M. H. CHRISTOL ..... Chimie (E.N.S.I.)
M. A. MARTINEAU ..... Mathématiques
Mme G. VERNET ..... Biologie Animale
M. L. CECCHI ..... Physique
M. ROBIN J. ..... Physique
M. J. REGNIER ..... Chimie

PROFESSEURS SANS CHAIRE :

Mme M.L. de POUCQUES ..... Botanique (C.S.U.P.)
M. P. MURAOUR ..... Géophysique Appliquée
Mme M. LAFON ..... Mathématiques
M. M. MATTAUER ..... Géologie
M. G. TOURNE ..... Chimie
M. L. EUZET ..... Zoologie (C.S.U.P.)
M. J. REMY ..... Géologie
M. H. ANDRILLAT ..... Astronomie
M. P. DEMANGEON ..... Géologie
M. A. BONNET ..... Botanique
M. A. SAVELLI ..... Physique
M. G. DELOUPY ..... Physique
M. L. GRAMBAST ..... Botanique
M. J.P. LAFON ..... Mathématiques
Mme Ch. DUBOUL-RAZAVET ..... Géologie (C.S.U.P.)
M. E. GROUBERT ..... Physique
Mme H. GUASTALLA ..... Biologie Physico-Chimique
Mme S. ROBIN ..... Physique

MAITRES DE CONFERENCES :

M. G. LAMATY ..... Chimie
M.R. GAUFRES ..... Chimie
M. F. PROUST ..... Géologie
M. A. BASSOMPIERRE ..... Physique
M. R. MARTY ..... Physiologie Animale
M. M. MAURIN ..... Chimie
M. J.J. SOULIER ..... Chimie (C.S.U.P.)
M.J. PARIS ..... Biologie Animale (C.S.U.P.)
Mlle A. BAILLETTE ..... Mathématiques (C.S.U.P.)
M. N. ROBY ..... Mathématiques (C.S.U.P.)
M. P. MOLINO ..... Mathématiques
Mlle N. PIREYRE ..... Physiologie Végétale
M. VIALLET ..... Chimie (C.S.U.P.)
M. G. BOUGNOT ..... Physique
M. Y. GUITTON ..... Physiologie Végétale (C.S.U.P.)
M. F. BOMBRE ..... Physique (C.S.U.P.)
M. L. THALER ..... Géologie

CHARGES D'ENSEIGNEMENT :

M. M. LEFRANC ..... Mathématiques
M. A. STURER ..... Mathématiques

SECRETAIRE PRINCIPAL :

M. E. SIAU

AVANT-PROPOS

Au début de ce travail, il m'est très agréable d'adresser mes remerciements et ma reconnaissance à Monsieur le Professeur SALVINIEN qui m'a constamment dirigé et orienté en me faisant bénéficier de ses hautes connaissances scientifiques. Monsieur le Professeur SALVINIEN me fait également le très grand honneur de présider le jury de thèse.

Je voudrais aussi exprimer toute ma gratitude à Messieurs les Professeurs VIELES et PISTOULET qui, après m'avoir dispensé leur enseignement au cours de mes études, se sont intéressés au sujet et ont accepté de siéger à ce jury.

Je remercie vivement Monsieur VIALLET, Maître de Conférence, qui parallèlement à Monsieur le Professeur SALVINIEN, m'a prodigué ses conseils et son aide.

Ce travail m'a été proposé par la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine ; pour tous les moyens qu'elle a mis à ma disposition, j'adresse mes remerciements à Monsieur FEGER, Directeur Général Adjoint, et à Monsieur RUTMAN, Directeur.

Je remercie, également Monsieur REY, Chef du Groupe Administration et Monsieur VACHER, Chef du Groupe Forage et Production de m'avoir accepté dans les Laboratoires du Centre de Recherches.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur LAZARRE, Chef du Service Physique des Fluides, à Monsieur FOURNIE, Ingénieur et à Mademoiselle ROUMAZEILLES, Chef du Laboratoire d'Analyses, qui, grâce à leur haute compétence et leur grande expérience, m'ont permis, jour après jour, d'ouvrir mon esprit à la recherche scientifique et de surmonter toutes les embuches qui se sont présentées.

Je veux aussi remercier tous les Ingénieurs, Techniciens et Employés pour leur collaboration fructueuse et sympathique, et tout particulièrement Monsieur ETCHEVERRIA pour l'aide efficace qu'il a apporté à l'élaboration de mon travail expérimental.

S O M M A I R E

I - MISE EN PRODUCTION ET PHASE INITIALE DES GISEMENTS

II - RECUPERATION SECONDAIRE

A/ - /INJECTION D'EAU/

B/ - /INJECTION DE GAZ/

1 - Gisement avec un gas-cap

2 - Injection directe dans l'huile.

III - LES INJECTIONS DE GAZ

A/ - /LE DIAGRAMME TERNAIRE APPLIQUE AUX PETROLES/

B/ - /UTILISATION DU DIAGRAMME TERNAIRE A L'ETUDE/ /DES MECANISMES D'INJECTION DE GAZ/

1 - Les gas drive non miscibles

a) à l'équilibre

b) vaporizing

c) condensing

2 - Les gas drive miscibles

a) vaporizing ou haute pression

b) condensing ou gaz riche

c) bouchon de solvant

IV - FACTEURS INFLUENCANT LES DEPLACEMENTS

A/ - /AU POINT DE VUE PHYSICO-CHIMIQUE/

1 - Influence de la pression

2 - Influence de la composition du gaz

B/ - /AU POINT DE VUE DYNAMIQUE DU DEPLACEMENT/

1 - Efficacité du balayage superficiel

2 - Digitation des écoulements visqueux

3 - Hétérogénéité du milieu

4 - Effet de la pesanteur

5 - Nature de l'huile du gisement

V - DEPLACEMENT DU BRUT DE LACQ SUPERIEUR PAR INJECTION DE BUTANE LIQUIDE

A/ - /APPAREILLAGE/

B/ - /EXPERIENCES DE DEPLACEMENT/

1 - Injection de butane par le haut du milieu poreux

2 - Injection de butane par le bas du milieu poreux

C/ - /CONCLUSIONS/

VI - ETUDE D'UNE HUILE SAHARIENNE - DETERMINATION DES CONDITIONS DE MISCIBILITE

A/ - /APPAREILLAGE/

1 - 4 Cellules haute pression

2 - Cellule de mélange

3 - Bain d'air thermostaté

4 - Mesures volumétriques

5 - Mesures des pressions

6 - Cellules de densité

7 - Chromatographie en phase vapeur

a) Description

b) Analyse

B/ - /EXPERIENCES/

1 - Zone "Gaz vaporisant l'huile"

a) Première étape :

- description de l'expérience et résultats
- courbe de variation de volume
- analyse du gaz
- mesure du facteur de compressibilité
- composition du point figuratif du mélange
- composition de l'huile à l'équilibre
- tracé du diagramme

b) Deuxième étape :

c) Troisième étape :

d) Quatrième étape :

e) Cinquième étape :

2 - Zone de "Gaz se condensant dans l'huile"

a) Description

b) Résultats

3 - Détermination du point critique

VII - RESUME ET CONCLUSION

I - MISE EN PRODUCTION ET PHASE INITIALE DES GISEMENTS -

Lorsqu'un gisement est mis en exploitation, la production de pétrole est obtenue par la libération de l'énergie du brut qu'il contient. Cette libératinn s'effectue suivant plusieurs mécanismes selon le type d'énergie, ces mécanismes pouvant agir soit simultanément ou évoluer durant cette phase active de la vie du gisement.

Les principaux types d'énergie sont :

1 - Energie de compression de l'huile

Cette énergie prévaut souvent dès le début de l'exploitation d'un gisement, mais elle est en général de faible importance. La compressibilité $X = \frac{1}{V}\frac{\Delta V}{\Delta P}$ avec P en bars V et ΔV exprimés avec la même unité est de l'ordre de $1,4.10^{-4}$, celle de l'eau beaucoup plus faible. Ainsi pour une huile sursaturée de 50 bars la production par expansion jusqu'à la pression de bulle serait de 0,7 % seulement de l'huile en place. Cependant on cite un gisement de la Ventura Avenue en Californie où la production par décompression jusqu'au point de bulle a été de 40 % de la production totale.

Dans un gisement soumis à ce seul type d'énergie, la pression baisse très rapidement avec la production.

2 - Energie de compression de l'eau dans l'aquifère en liaison avec le gisement d'huile :

L'aquifère est la zone d'eau sous-jacente à la nappe de pétrole. S'il est important, l'énergie de compression de l'eau est très grande. Dans les gisements où ce type d'énergie est prépondérant

les pressions restent sensiblement constantes jusqu'à l'épuisement, c'est l'énergie disponible dans le gisement de LACQ Supérieur.

3 - Energie de compression du gaz dissous ou du gaz libre :

La plupart des huiles contiennent, dans les conditions de fond, du gaz dissous. Quand la pression de bulle est atteinte, le gaz se détend et expulse d'abord de l'huile des pores, puis quand la quantité libérée est suffisante pour qu'il y ait écoulement, il entraîne de l'huile dans son mouvement vers les puits.

Certains gisements comportent du gaz libre à leur partie supérieure, appelée couramment par le terme américain de "gas-cap". L'énergie de ce gaz comprimé sert à drainer l'huile vers les puits et l'élever jusqu'en surface.

Dans ces deux types de gisement la pression décroît rapidement avec la production.

La récupération primaire à attendre à l'exploitation d'un gisement est fonction de nombreuses variables

- Caractéristiques structurales du gisement
- caractéristiques du milieu poreux
- caractéristiques de l'huile
- techniques d'exploitation.

Cependant le facteur prépondérant est le type d'énergie qui provoque l'expulsion de l'huile. Dans les gisements à gaz dissous la récupération varie de 20 à 50 % de l'huile initialement en place, elle est en moyenne de 33 %. Dans les gisements à aquifère la récupération

est en principe meilleure, elle est moyenne de 50 % et varie entre 20 et 80 %. Mais il y a des exceptions comme dans le gisement de LACQ Supérieur où la récupération est inférieure à 10 %.

Jusqu'à ces dernières années, cette récupération naturelle suffisait à subvenir aux besoins. Mais la rareté, le coût de la recherche de nouveau gisements et l'augmentation de la demande ont poussé l'industrie pétrolière à orienter ses recherches dans le sens d'une meilleure exploitation des gisements déjà découverts.

De nouvelles techniques ont été créées, en particulier, la récupération secondaire en vue de forcer dehors le pétrole restant dans la couche lorsque le jaillissement naturel est épuisé. Cela est obtenu par le maintien de la pression à l'intérieur du réservoir par injection d'un fluide. Cette opération devant évidemment être d'un prix de revient inférieur au prix de marché du pétrole récupéré.

Ce moyen permet de récupérer une grande partie du pétrole restant et peut être complété par une récupération dite tertiaire qui épuiserait le gisement en faisant brûler la couche. L'expansion des gaz de combustion aidée de la chaleur qu'elle provoque, diminuant la viscosité de l'huile, chasse le brut restant encore dans la couche.

II - LA RECUPERATION SECONDAIRE -

A - /PAR INJECTION D'EAU/

Ce type de déplacement a été le premier réalisé pour compléter le drainage naturel dans le cas d'un gisement avec aquifère. C'est sur le champ de BRADFORD en Pennsylvanie où l'on avait noté dès 1907 une augmentation de la production du champ qui paraissait liée à des venues d'eau dûes à de mauvaises cimentations de tubages, que quelques essais d'injection d'eau furent entrepris. Sur le vu des résultats encourageants obtenus on étendit peu à peu le procédé à une bonne partie du champ.

Ce type de récupération peut être appliqué aussi aux gisements du type à gaz dissous.

Comme les installations nécessaires à la mise en place d'une installation d'injection d'eau sont importantes, il faut que le gisement réponde à certaines conditions pour que l'opération soit rentable :

- réserves en place importantes : ce qui suppose un certain volume de réservoir et une certaine saturation résiduelle en huile. En particulier si le gisement a été déjà soumis à une poussée d'eau naturelle, la quantité d'huile est trop faible pour être récupérée.

- des conditions d'homogénéité, de continuité et de perméabilité du terrain.

Dans ces conditions la récupération secondaire à atteindre est souvent très importante. Elle est souvent du même ordre de grandeur que la récupération primaire et même parfois supérieure (cas du champ à WOODSEN, Texas).

Le procédé a subi de nombreuses améliorations ce qui nous donne plusieurs variantes :

- addition d'agents tensio-actifs afin de réduire les tensions interfaciales entre eau et huile. Bien que les essais de laboratoire aient été satisfaisants, les résultats sur chantier furent décevants par suite de l'absorption rapide des produits sur les pores ou sur les argiles aux abords du puits.

- injection d'un mélange eau-alcool partiellement miscible à l'huile du réservoir (1,2). Ce procédé a été appliqué notamment aux champs de BRADFORD (3,4) et de JOHNSON FIELD (5).

- de récents travaux de laboratoire (6) font état d'une injection de solutions très diluées de polymères synthétiques de haut poids moléculaire réduisant la mobilité de l'eau dans les milieux poreux beaucoup plus que l'on pouvait s'y attendre d'après la viscosité. Les essais ont permis de récupérer jusqu'à 100 % de plus d'huile qu'avec d'autres injections d'eau.

- injection simultanée d'eau et de gaz (7), le procédé peut être considéré comme un intermédiaire entre l'injection d'eau et l'injection de gaz. En effet, il consiste à injecter de l'eau avec le gaz qui pousse la zone miscible.

Cette eau diminue la mobilité totale. La principale condition a réaliser est qu'il existe une zone de gaz entre le front d'avancement et l'eau. La Société Mobil essaie sur le champ du Texas Gulf Coast une injection d'eau après un bouchon de propane et butane (8).

- il a aussi été essayé, sans succès semble-t-il l'injection de CO_2 avant une injection d'eau (9).

B - /PAR INJECTION DE GAZ/

Le premier essai d'injection de gaz a eu lieu en 1903 dans le champ de MACKS BURG, longtemps avant le premier essai d'injection d'eau.

Toutefois, pendant longtemps, on s'est moins intéressé à l'étude de ce procédé de récupération secondaire et on dispose de peu de résultats d'expériences, celles-ci ayant été faites sans grand souci d'efficacité. Le gaz était en effet un sous produit qui très souvent ne pouvait être commercialisé ; les frais d'installation de compresseurs et d'équipement complémentaire de puits n'étaient pas très importants et en cas d'échec les pertes étaient peu élevées.

Avant d'étudier ces modes d'injections, il s'impose de définir quelques termes, qui seront utilisés par la suite et qui sont nécessaires pour comprendre les phénomènes,

- Saturation : la saturation en un fluide d'une formation est la fraction du volume effectif des pores occupés par le fluide considéré.

- <u>perméabilité</u> : c'est la mesure de la facilité avec laquelle un milieu poreux se laisse traverser par un fluide. Elle s'exprime à l'aide du coefficient K de perte de charge déduit de la loi de DARCY pour des écoulements unidirectionnels laminaires de liquides en milieu poreux.

$$a = K \frac{S}{\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

q = débit
K = perméabilité
S = section totale
η = viscosité du liquide
ΔP = perte de charge
L = longueur

Cette formule appliquée à l'écoulement d'un liquide de référence nous donne la <u>perméabilité intrinsèque</u> du milieu poreux.

Cette même formule appliquée aux écoulements diphasiques avec pour chacun des deux fluides un débit partiel q_1 et q_2

$$q_1 = K_1 \frac{S}{\eta_1} \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

$$q_2 = K_2 \frac{S}{\eta_2} \frac{\Delta P}{L} \quad (2')$$

détermine K_1 et K_2 qui sont des <u>perméabilités effectives</u> aux fluides utilisés.

Afin de faire intervenir dans les formules (2) et (2') la perméabilité intrinsèque au milieu poreux, on écrit :

$$q_1 = K \times \frac{K_1}{K} \times \frac{S}{\eta_1} \frac{\Delta P}{L} = K \times k_1 \times \frac{S}{\eta_1} \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

$$q_2 = K \frac{K_2}{K} \times \frac{S}{\eta_2} \frac{\Delta P}{L} = K \times k_2 \frac{S}{\eta_2} \frac{\Delta P}{L}$$

où intervient le rapport $\frac{K_1}{K} = k_1$ qui est la perméabilité relative au fluide 1.

Comme les perméabilités sont déterminées pour un écoulement unidirectionnel on distingue :

- permeabilité horizontale ou latérale qui correspond à des écoulements de fluides parallèles au litage

- perméabilité verticale ou frontale qui correspond à des écoulements perpendiculaires au litage.

- Mobilité est par définition le rapport $\frac{k}{\eta}$

1 - Injection dans les gisements à gaz-cap :

Ce gas-cap pouvait exister avant la mise en exploitation du gisement, ou bien s'être formé au cours de la récupération primaire : une partie du gaz libéré de solution sous l'effet de la décompression s'est rassemblé dans les parties hautes du gisement.

Par extension du gas-cap, c'est-à-dire par injection de gaz, on peut provoquer le balayage de la zone à huile sans baisse de pression. C'est pourquoi l'on utilise les termes de "recompression" ou de "maintien de pression".

C'est là que réside l'avantage essentiel de l'injection dans ce cas ; en effet, si l'on provoquait l'expansion du gas-cap sans injection, l'huile serait balayée moyennant une baisse de pression importante, cette baisse provoquerait la libération de gaz dissous qui augmenterait la saturation en gaz libre, donc la perméabilité relative k au gaz.

Le gaz dont la viscosité η est faible, donc la mobilité k/η importante aurait alors tendance à cheminer plus vite que l'huile dont une partie importante ne serait pas déplacée d'autant plus que le dégazage de l'huile augmente sa viscosité. Le rapport volumétrique de gaz sur l'huile (couramment nommé en terme pétrolier G.O.R. (gas oil ratio) augmente constamment surtout si la ségrégation est mauvaise, c'est-à-dire si peu de gaz libéré rejoint le gas-cap.

Dans le cas d'un maintien de pression le G.O.R. n'est constant jusqu'au moment où le front d'avancement arrive à la sonde de production. Il est donc souhaitable de ne pas trop attendre avant de démarrer un plan de recompression afin que la saturation en gaz libre soit faible. Le déplacement de l'huile a lieu de haut en bas la pesanteur tend à interdire au gaz les cheminements préférentiels (failles, zones très perméables) et permet ainsi un balayage plus efficace. Il faut que l'huile puisse se mouvoir vers le bas, donc la perméabilité verticale soit assez grande (ce qui semble d'ailleurs indiquer la présence d'un gas-cap, mais il est utile de s'en assurer car ce n'est pas toujours le cas, le gaz ayant pu migrer indépendamment de l'huile sans la traverser.)

2 - <u>Injection directe de gaz dans l'huile</u> :

Ce type d'injection de gaz est surtout applicable aux structures plates de grande étendue, et il a l'avantage de créer un balayage par le gaz qui n'existe pas naturellement. Le déplacement a lieu radialement à partir de la sonde d'injection vers les puits producteurs. Contrairement au premier cas, il y a intérêt à avoir une perméabilité verticale très faible pour que le gaz ne soit

pas tenté de circuler dans les seules parties hautes de la couche par ségrégation.

Dans le premier cas le nombre de puits d'injection peut avoir de l'importance pour des considérations de débit, il n'en est pas de même pour leur implantation, car il s'agit seulement d'alimenter le gas-cap. Dans ce cas-ci, il faut introduire, comme pour les injections d'eau, la notion d'efficacité de balayage, c'est-à-dire la fraction de l'aire totale du réservoir effectivement drainée, et qui est fonction de la disposition des sondes. Nous étudierons plus loin cette notion de balayage. Citons cependant les travaux de Muskat (10) sur l'efficacité de plusieurs schémas d'implantation, en supposant le rapport des mobilités égal à 1.

particulier joué par les hydrocarbures intermédiaires C_M qui sont les principaux composants impliqués dans les échanges.

DEUX SORTES DE REPRESENTATION TERNAIRE -

Pour représenter l'évolution de la composition, on peut utiliser :

1. - La représentation à l'aide d'un triangle équilatéral $C_1 C_M C_7^+$, dont chacun des sommets représente une concentration de 100 % en chacun des groupes d'hydrocarbures (fig.1a).

Un point A intérieur au triangle représente un mélange d'hydrocarbures dont le pourcentage en C_1 est donné par la distance de ce point au côté opposé à C_1. De même pour les pourcentages en C_M et en C_7^+.

Si au complexe A on mélange un autre complexe B, le point figuratif au mélange formé se trouve sur le segment AB, son positionnement sur AB dépend des quantités de A et B qui ont été mélangées.

Cette représentation est la plus couramment utilisée, notamment par Casanova (11) et Cook (12) dans leurs bibliographies sur la récupération seconcaire.

2. - Un autre mode de représentation est établi à l'aide d'un triangle rectangle isocèle (fig. 1b). Sur chaque côté de l'angle droit est porté le pourcentage en C_1 et C_M. Le pourcentage des C_7^+ est obtenu par différence à 100. Cette représentation a été utilisée notamment par Benham, Dowden et Kunzman (13), car elle ramène l'étude des parties des droites représentant des échanges à un système rectangulaire.

COURBE LIMITE DES PHASES (fig. 2)

Le diagramme ternaire est utilisé pour expliciter les échanges qui s'effectuent dans les mélanges d'hydrocarbures, étudier les évolutions... La courbe tracée pour une température et une pression est appelée courbe limite des phases. La partie supérieure de cette courbe, voisine du sommet C_1 représente le gaz à son point de saturation (courbe de rosée), la partie inférieure représente le liquide saturé (courbe de bulle). Le point P qui raccorde la courbe de bulle à la courbe de rosée est le point critique.

Un liquide l_1 à son point de bulle ne peut être en équilibre qu'avec un gaz bien défini g_1 situé sur la courbe de rosée. La droite l_1g_1 est appelée droite de raccordement des points huile et gaz en équilibre entre eux. Les droites de raccordements seraient parallèles à $C_1C_7^+$ si les seuls échanges possibles entre un gaz et une huile concernaient les composants moyens C_M. Dans cette hypothèse, un liquide et une vapeur en équilibre ayant le même pourcentage de C_M seraient bien sur une parallèle à C_1C_7+. Cette hypothèse n'est pas rigoureuse car des échanges de moindre importance ont lieu entre les C_1 et les C_7^+ du gaz et de l'huile.

La limite des droites de raccordement devient tangente au point critique, cette tangente et la courbe limite des phases déterminent à l'intérieur du triangle quatre régions :

- <u>région diphasique</u> : à l'intérieur de la courbe limite des phases. Un point M représentatif d'un mélange donne un équilibre $g_1 \rightleftharpoons l_1$.

- <u>région gazeuse</u> : c'est la zone au-dessus de la courbe de rosée.

- <u>région liquide</u> : c'est la zone au-dessous de la courbe de bulle.

- <u>région critique</u> : se trouve à droite de la tangente à la courbe limite des phases au point critique. Ce sont les mélanges riches en hydrocarbures intermédiaires définis par Cook (14): mélanges critiques.

Chaque diagramme est établi pour une température et une pression données, nous étudierons plus loin les effets de ces paramètres sur la courbe limite des phases.

Cette représentation n'est pas thermodynamiquement rigoureuse du fait que les trois groupes de constituants ne sont pas des corps purs et qu'il y a des équilibres qui s'établissent à l'intérieur de chacun des groupes ; mais il est impossible d'étudier tous les équilibres. Néanmoins cette représentation pseudo ternaire est très pratique et suffisamment exacte pour être appliquée au domaine de l'industrie pétrolière.

B - /UTILISATION DU DIAGRAMME TERNAIRE AUX DEPLACEMENTS GAZEUX/

Suivant les positions des points figuratifs de l'huile et du gaz par rapport à la courbe limite des phases et à la zone des mélanges critiques on peut différencier plusieurs types de déplacements. Nous verrons, d'après la description des mécanismes de déplacement de chacun d'eux, qu'il est possible de les classer en deux groupes.

- <u>Les déplacements non-miscibles</u> pour lesquels, après de nombreux contacts entre l'huile et le gaz déplaçant, malgré les échanges qui peuvent intervenir, on n'arrive pas à avoir une zone de miscibilité dont la composition varie sans discontinuité

de celle du gaz à celle de l'huile. Nous pouvons anticiper ces résultats, afin de pouvoir mettre ces déplacements dans ce groupe, en disant qu'ils se produisent lorsque ni le gaz, ni l'huile ne se trouvent dans la zone des mélanges critiques.

- Les déplacements miscibles : lorsque le gaz ou l'huile se trouve dans la zone des mélanges critiques. Deux cas peuvent se produire suivant que la droite raccordant leurs points figuratifs coupe ou ne coupe pas la courbe limite de phases

- si elle ne la coupe pas : la miscibilité est directe
- si elle la coupe, après une série d'échanges, une zone de miscibilité dont la composition est continue du gaz à l'huile se crée

Afin d'épuiser tous les cas qui peuvent se produire, citons ici celui où le gaz et l'huile se trouvent tous deux dans la zone de mélanges critiques. Le gaz et l'huile seront directement miscibles puisque la droite joignant leurs points figuratifs ne coupe pas la courbe limite des phases. Ce cas ne sera pas étudié car il ne se produit pas. En effet on préfèrera dans ce cas injecter un gaz moins riche en C_M (donc moins coûteux) qui nous ramènera à un des cas précédents.

1. LES DEPLACEMENTS NON-MISCIBLES -

que nous pouvons subdiviser en trois types :

a) Déplacement à l'équilibre :

Le gaz injecté et l'huile en place sont représentés par des points tels que A et B (fig.3a). Il n'y a pas ou presque pas d'échanges entre le gaz et l'huile. Le gaz s'écoule sans modifier la composition de l'huile et sans subir lui même de modifications.

C'est le cas de la réinjection directe du gaz qui est associé dans le puits à l'huile de production. Dans ce cas, la récupération secondaire est faible, le déplacement est peu efficace car le gaz n'intervient que par son effet de piston. Et le gaz est un mauvais piston à cause de sa faible viscosité et que de plus il ne "mouille" pas la roche, c'est-à-dire qu'il ne peut déplacer la pellicule d'huile restant accrochée à la roche par capillarité.

b) Injection non miscible de gaz vaporisant l'huile (fig.3b) où le gaz est moins riche que l'huile en hydrocarbures intermédiaires. Ce déplacement est plus intéressant que le précédent car le gaz injecté G, en plus de son effet de piston, s'enrichit en hydrocarbures intermédiaires et lourds jusqu'à la composition g_t en équilibre avec h_t ; à ce moment là les 3 points G_t, h_t et h. Cet enrichissement du gaz G s'effectue aux dépens de l'huile restante irrécupérable et restitue en surface les composants enlevés à l'huile.

c) Injection non miscible de gaz se condensant dans l'huile : (fig.3c)
Le gaz est plus riche que l'huile en hydrocarbures intermédiaires. Ce déplacement est plus intéressant que le premier car l'huile H du puits après de nombreux contacts avec le gaz injecté G s'enrichit en composants légers jusqu'à la composition Ht. Cet enrichissement s'effectue avec une augmentation de volume puisqu'elle dissout des composants du gaz, et une diminution de viscosité, d'où un meilleur rendement.

Ces trois types de déplacements non miscibles sont obtenus lorsque ni le gaz, ni l'huile, ne se trouvent dans la zone critique. Et s'ils sont bien différenciés ici, ce n'est pas toujours le cas dans la réalité où il arrive souvent que le gaz et l'huile sont insaturés. Nous étudierons plus loin l'influence de la sous-saturation sur la récupération, et les travaux antérieurs qui la concerne.

2. LES DEPLACEMENTS MISCIBLES -

La récupération complète de l'huile contenue dans un milieu poreux n'est possible qu'à la condition d'éliminer les forces capillaires qui retiennent une fraction de cette huile.

Ces forces peuvent être éliminées si l'on utilise pour déplacer l'huile un fluide qui lui soit miscible en toute proportion, c'est-à-dire qui ne forme pas avec elle d'interface entraînant l'apparition de forces capillaires.

Cependant ce procédé paraissait très coûteux dans le cas où le gaz injecté ne donnait pas une miscibilité directe et n'a été retenu qu'en s'apercevant qu'un déplacement miscible pouvait être obtenu en n'utilisant qu'une quantité relativement faible de produits miscibles à l'huile. Des travaux de laboratoire montrèrent que le milieu poreux favorisait un mélange complet et assez rapide des deux phases miscibles en contact, ne laissant que très peu d'huile susceptible de diluer dans la phase déplaçante derrière le front d'avancement. Il était donc possible de déplacer toute l'huile à condition de pouvoir déplacer à son tour la phase miscible par un gaz de prix de revient relativement bas. Les différents procédés de déplacement miscible par injection de de gaz sont donc :

- injection de gaz à haute pression (gaz vaporisant de l'huile)
- injection de gaz riche (gaz se condensant dans l'huile)
- injection d'un bouchon de solvant suivi d'une injection de gaz.

a) Injection de gaz à haute pression ou injection de gaz vaporisant l'huile :

Dans les conditions de température du réservoir et de pression à laquelle on veut réaliser l'injection de gaz, rapportons-nous au diagramme ternaire représentant la courbe limite des phases pour le système : méthane, hydrocarbures intermédiaires et hydrocarbures lourds (fig. 4a).

Le point figuratif du gaz injecté est G. Pour qu'il puisse y avoir formation d'un "banc miscible", c'est-à-dire d'une zone dont la composition varie graduellement de celle de l'huile à celle du gaz sans qu'il y ait discontinuité entre les deux, il est nécessaire que la nature de l'huile du gisement soit telle que son point figuratif H soit dans la zone des mélanges critiques.

En effet lorsqu'on injecte le gaz dans la formation il se passe tout d'abord un début de poussée de gaz laissant derrière elle une certaine quantité d'huile résiduelle. Le contact qui s'établit entre le gaz G et cette huile résiduelle H entraîne un échange d'hydrocarbures entre ces deux phases ; et l'on obtient à l'équilibre un gaz g_1 qui s'est enrichi laissant une huile résiduelle h_1 plus pauvre en hydrocarbures intermédiaires que H. Le gaz g_1 poussé par de nouveaux apports de gaz, vient en contact avec une nouvelle quantité d'huile résiduelle H d'où un nouvel équilibre de phases saturées g'_2 et h'_2. Et ainsi de suite jusqu'à ce que le gaz en avant du front d'avancement atteigne progressivement la composition g_t qui est celle du gaz saturé au point de contact de la tangente, menée de H à la courbe de rosée. Le gaz g_t est alors miscible en toute proportion à l'huile H et le déplacement s'effectue sans interfaces.

A l'arrière du banc miscible les huiles résiduelles de composition h_2, h_3 ... continuent à s'appauvrir en hydrocarbures intermédiaires au contact de nouvelles quantités de gaz G qui viennent en contact avec elle.

L'huile h_1 devient h_2 enrichissant G jusqu'à la composition g_2, et ainsi de suite jusqu'à la composition h^m où elle ne pourra pratiquement plus rien céder au gaz G et sera définitivement perdue pour la récupération. Théoriquement si le gaz est fortement sous saturé le mélange de grandes quantités de G et de faibles quantités de h^m doit pouvoir se situer dans la région gazeuse, et l'huile résiduelle disparaître. Mais en réalité les C_7^+ contenus dans l'huile n'ont pas du tout la même composition interne que ceux beaucoup plus légers qui peuvent exister dans un gaz et la vaporisation de l'huile résiduelle ne pourra avoir lieu complètement.

Les figures 4b et 4c permettent de schématiser les variations de la composition du bouchon miscible à partir du moment où il est complètement formé. De l'avant vers l'arrière dans le sens du déplacement ou de droite à gauche sur la figure 4c, on a, après l'huile vierge du gisement :

- une zone critique miscible à l'huile H directement et dont la composition varie de H à g_t.

- une zone de gaz partiellement enrichi non miscible à l'huile du réservoir. Dans cette zone le gaz et l'huile sont en équilibre diphasique. La composition du gaz varie de g_t à g_m tandis que celle de l'huile varie de h_t à h_m. Les taches sombres schématisent l'huile résiduelle.

- enfin la zone de gaz injecté, avec le résidu d'huile restant en place.

Ce type de déplacement, étudié surtout par l'Atlantic Refining Co sur le champ de BLOCK 31 (15 à 18) convient tout particulièrement aux gisements dont l'huile est riche en hydrocarbures intermédiaires (35 à 40 %). Ce sont en principe des gisements profonds dont

la température et la pression sont relativement élevées. Les pressions d'utilisation sont 200 bars et le plus souvent aux alentours de 300 bars. Ce procédé est caractérisé par la grande stabilité du front d'avancement. Si pour une raison quelconque le gaz injecté venait à traverser et dépasser le front miscible, un nouveau se reformerait aussitôt (une dizaine de mètres suffirait) suivant le même processus, et tout rentrerait dans l'ordre.

b) Injection de gaz enrichi ou injection de gaz se condensant dans l'huile :

Dans ce procédé la formation du banc miscible est obtenue aux dépens des hydrocarbures intermédiaires contenus dans le gaz. Prenons à nouveau la représentation ternaire pour suivre le processus de déplacement (fig. 5a).

Le fluide injecté est représenté par le point G qui dans les conditions du réservoir est situé dans la zone critique. La teneur en fraction intermédiaire est élevée. L'huile de réservoir est représentée par le point H.

Tout d'abord comme dans le cas précédent il y a une poussée de gaz qui laisse derrière elle une certaine quantité d'huile résiduelle. Du contact entre G et cette huile résiduelle, résultera un équilibre $g_1 \rightleftharpoons h_1$ qui enrichira l'huile résiduelle en intermédiaires et appauvrira le gaz qui continuera à avancer et maintiendra la poussée. L'huile enrichie aura augmenté de volume sans participer à l'écoulement. Un nouveau contact avec G amènera l'huile à la richesse h_2. Ce processus va se poursuivre jusqu'à l'obtention de la miscibilité complète entre le gaz et l'huile qui sera enrichie jusqu'à la composition h_t. La composition limite h_t est celle correspondant au point de contact de la tangente minée de G à la courbe de liquide saturé.

En effet la droite Gh_t ne coupe plus la courbe limite des phases on n'a plus de nouvel équilibre entre G et h_t, ils sont directement miscibles. A ce moment il sera formé un banc d'huile enrichie qui permettra un déplacement miscible de l'huile résiduelle laissée par le gaz avançant.

La quantité de gaz appauvri qui se trouve à l'avant du banc miscible sera réduite progressivement par absorption dans de nouvelles quantités d'huile résiduelle avec lesquelles il se trouve en contact. Le processus sera celui de la transformation progressive de g_1 vers la limite g_p (gaz le plus pauvre) en passant par g_a, g_b ... Comme ces gaz sont en quantité limitée ils seront réduits très rapidement par dissolution dans l'huile, à des quantités telles que l'on aura du gaz résiduel ne pouvant plus participer à l'écoulement et qui sera dépassé par le banc miscible et dilué dans le gaz pousseur. Il se peut même qu'une huile fortement sous-saturée finisse par dissoudre tout le gaz en avant.

Quel que soit le mode de disparition du gaz à l'avant du front miscible, on aura alors atteint le déplacement miscible de l'huile vierge du réservoir. On aura de l'avant vers l'arrière (fig.5b) sans transitions brutales entre les différentes zones :

- l'huile H du réservoir
- la zone diphasique en avant du banc dans laquelle la composition de l'huile varie de H à h_t et celle du gaz de g_p à g_t.
- la zone miscible variant progressivement de h_t à G
- le gaz pousseur G.

Le gaz riche G pourra être soit un gaz naturel provenant d'un gaz de séparateur du brut produit, soit un gaz naturel pauvre que l'on aura enrichi d'hydrocarbures intermédiaires avant l'injection.

Mais ces hydrocarbures de l'éthane à l'hexane sont des produits onéreux et il est d'un grand intérêt d'en réduire au maximum les quantités injectées. Donc il sera avantageux une fois le banc miscible formé, de le pousser par un gaz pauvre G_p miscible en toute proportion au gaz riche à l'arrière du front d'avancement.

Cependant pour assurer la stabilité du front miscible, et le réformer au cas où les variations de structure du milieu poreux auraient permis au gaz de le rompre, (18), il sera nécessaire de disposer d'une quantité de gaz riche en arrière du front. Cette quantité variera suivant la nature du gaz et de l'huile en présence. En effet, plus les points représentatifs sont éloignés sur le diagramme, plus il faudra de gaz pour arriver à la miscibilité.

L'injection de gaz enrichi qui fut tout d'abord étudiée par la Humble Oil (20), trouve son application dans un domaine plus étendu que celui de l'injection de gaz à haute pression (21,22,23). Il n'est pas limité par de faibles profondeurs pas plus que par la composition de l'huile.

Nous verrons plus loin les études qui ont été faites sur la composition du gaz à injecter.

c) Injection d'un bouchon de gaz liquéfié :

Au lieu de former naturellement le banc miscible par des échanges huile-gaz comme dans les deux cas précédents, on peut se contenter d'injecter un bouchon de gaz de pétrole liquéfié, constitué essentiellement de propane et butane. Le bouchon sera ensuite refoulé par injection de gaz pauvre (principalement du méthane) qui assure le déplacement dans le milieu poreux.

Le bouchon est entièrement miscible à l'huile du gisement (fig.6a) en effet la droite reliant le point H représentatif de l'huile avec le sommet C_M du triangle représentant le bouchon ne coupe pas la courbe limite des phases. Le déplacement aura lieu sans interfaces, mais le bouchon agissant comme un solvant se chargera petit à petit d'une certaine quantité d'huile qui établira une zone de transition entre le solvant et l'huile. Si le bouchon est suffisamment long, la condition de miscibilité avec le gaz est : la pression à l'intérieur du gisement doit être supérieure à la pression critique de condensation du mélange gaz-solvant. Les conditions peuvent être traduites sur le diagramme de la manière suivante :

- entre l'huile et le solvant la zone de transition a des compositions qui s'étalent du point H au sommet G_M du triangle représentant le solvant pur.

- entre le solvant et le gaz pousseur, dans le cas de la figure, la miscibilité est totale puisque l'on se trouve au-dessus de la pressinn critique de condensation. Si l'on se trouvait en dessous de cette pression la courbe limite des phases rencontrerait le côté C_1 C_M du triangle (fig. 6b) et l'on aurait équilibre entre le gaz G et le bouchon de solvant et non miscibilité directe.

IV - FACTEURS INFLUENCANT LES DEPLACEMENTS -

Après la description des principes et mécanismes des procédés d'injection de gaz, nous rappelons ici les principaux travaux qui ont été faits sur ce sujet. Ces travaux sont nombreux mais il est difficile d'établir des relations logiques entre eux. En effet on ne peut tirer pour une nouvelle étude aucune loi rigoureuse, mais seulement des indications d'ordre général qui nous permettront d'orienter nos recherches. Ceci est dû au fait que trop de facteurs et de variables différents interviennent pour chaque cas.

Nous allons cependant à l'aide des travaux les plus marquants essayer de dégager le maximum d'information sur chacune des différentes influences agissant sur un déplacement.

Nous étudierons ces influences à deux points de vue

- au point de vue physicochimique
- au point de vue dynamique du déplacement.

A - /INFLUENCES PHYSICO-CHIMIQUES INTERESSANT LA STATIQUE OU LA/ /FORMATION DU DEPLACEMENT MISCIBLE/

1. Influence de la pression

a) Détermination expérimentale de la pression de miscibilité

DEFRENNE, MARLE (24) et KOCH, HUTCHINSON (25) ont déterminé la pression de miscibilité pour des déplacements de plusieurs huiles par des gaz donnés. Les conditions de débit et d'orientation du massif poreux, sont maintenues identiques pour toute la série

d'expérience, à l'exception de la pression qui a une valeur différente pour chaque déplacement. Pour chaque expérience on note le taux de récupération (rapport des volumes de l'huile récupérée à l'huile en place) obtenu à un instant déterminé (début de l'arrivée du gaz dans l'effluent, ou pour un certain volume de gaz injecté). Ce taux de récupération est porté sur un graphique en fonction de la pression. Les points se placent sur une courbe présentant une rupture de perte pour une valeur de la pression qui est celle de la pression de miscibilité (fig.7). Ceci est vérifié en observant l'effluent à travers une cellule à fenêtre ; pour la pression à laquelle il y a une rupture de pente. Dans la courbe de récupération, l'écoulement évolue graduellement de l'huile monophasique de départ jusqu'à la phase gazeuse juste avant l'abandon. Cette méthode ne peut donner de bons résultats que si l'efficacité du déplacement qui est le principal facteur influençant le taux de récupération est la même pour la série d'expériences.

Ces expériences ont permis de vérifier l'indépendance de la pression de miscibilité et des conditions mécaniques de déplacement ce qui permet d'utiliser un milieu poreux n'ayant rien à voir avec la roche réservoir contenant l'huile étudiée. Cette méthode, à notamment permis à KOCH et HUTCHINSON de déterminer les variations de la pression de miscibilité en fonction du pourcentage d'azote contenu dans du méthane servant de gaz d'injection. MAUL et SMITH (26) ont aussi étudié ces mêmes variations en fonction de la composition de la zone de mélange.

b) Influence de la pression sur la courbe limite des phases :

Dans les projets d'injection de gaz du type "gaz vaporisant de l'huile" le brut a le plus souvent une composition le plaçant dans

la zone liquide du diagramme ternaire. Or, si l'on comprime le gisement la surface correspondant à la région diphasique diminue (fig.9), et pour une certaine pression le point représentatif du brut se trouvera dans la zone critique. On pourra alors obtenir un déplacement miscible. C'est pour cela que ce procédé est aussi appelé "injection de gaz à haute pression". Cette pression est déterminée par la méthode décrite auparavant.

c) Influences de la pression sur les propriétés physiques de l'huile et du gaz :

Une fois les conditions de miscibilité obtenues, l'augmentation de pression favorise l'augmentation du taux de récupération. Plusieurs auteurs ont étudié cette influence. Parmi eux, citons SLOBOD, KOCH (27) et BROWNSCOMBE (28) qui étudie ce taux de récupération pour différentes huiles à deux pressions différentes 275 et 240 bars. Afin d'obtenir une classification de ces huiles, il a été établi un facteur de corrélation m tenant compte de la teneur en hydrocarbures intermédiaires et du poids moléculaires des hydrocarbures lourds

$$m = \frac{\% \text{ CM dans le brut}}{\text{Poids Moléculaire des } C_7^+} \times 100$$

Plus ce facteur est élevé (ce qui signifie que l'huile est légère et riche en hydrocarbures intermédiaires), plus l'huile est susceptible de se déplacer facilement. Comme le montre la figure 8 l'augmentation du taux de récupération avec la pression est sensible.

D'autres auteurs : ZAKS (29), KEHN, PYNDUS et GASKELL (30) ont aussi étudié et noté l'amélioration due à l'augmentation de pression. Ceci est assez facilement explicable :

- à cause de la sous-saturation de l'huile : plus la pression s'élève, plus le point figuratif de l'huile s'éloigne de la courbe limite des phases ce qui augmente son caractère de sous-saturation. Rapportons-nous à la figure 3a, le changement de H à B représente un gonflement de l'huile, dû à un enrichissement en hydrocarbures légers qui diminue la viscosité. Le gonflement de l'huile et sa diminution de viscosité s'associent pour améliorer le déplacement. Cette influence a été étudiée en particulier par WHORTON, KIESCHNI K (31) et SLOBOD, KOCH (27) (fig.8).

- augmentation de la viscosité du gaz qui ramène le rapport de mobilité M à des valeurs plus favorables (nous l'étudierons dans les influences dynamiques).

- accélération de la formation de la zone miscible : la zone de transition diphasique, au cours de laquelle s'effectuent les échanges sera plus courte, puisque la surface de la région diphasique diminue quand la pression augmente.

2. Influence de la composition du gaz

Comme dans le cas précédent où l'on agit sur la pression, ici pour l'injection des "gaz se condensant dans l'huile" on agit sur la composition du gaz pour obtenir la miscibilité. En effet, le point figuratif du gaz doit se trouver dans la zone critique.
De nombreux auteurs ont étudié l'influence de la composition du gaz sur le taux de récupération.
Nous citerons parmi les plus importants :

- STONE et CRUMP (32) qui déplacèrent sous une pression de 137 bars et à la température de 53°C une huile de densité 0,790 ayant une pression de saturation de 65 bars.

Les gaz déplaçants étaient :

- gaz de séparateur : gaz produit à la détente du brut dans les installations de surface pour le stabiliser aux conditions atmosphériques

- gaz à condensat : gaz qui par détente isotherme peut donner lieu à une phase liquide

- gaz enrichi en propane
- gaz enrichi en éthane
- gaz mixte (contenant moitié C_1 - moitié C_M)
- gaz en équilibre avec l'huile à l'intérieur du gisment.

Les compositions de ces différents gaz, ainsi que celle de l'huile sont montrées tableau 1, les résultats des déplacements (fig. 11)

- Les travaux d'ARNOLD, STONE et LUFFEL (33) avaient pour but de déterminer l'efficacité de petits bancs de gaz enrichi poussés par du méthane et les effets de la variation de la grandeur et de la composition de ces bancs sur l'efficacité de la récupération. Ceci afin d'éviter tout au long de l'injection l'utilisation d'un gaz enrichi de prix de revient élevé. Le gaz enrichi contenait 25 % de n-butane, les conditions expérimentales étaient 71°C et 175 kg/cm2. Les déplacements conduits en utilisant des bancs de grandeur 0,10 et 0,20 du volume des pores (volume du milieu poreux x porosité) donnèrent l'apparence de déplacements miscibles ; tandis que celui fait avec un banc de 0,05 du volume des pores ne l'était pas. Les résultats sont montré fig. 12. Il faut donc déterminer la quantité minimale nécessaire de banc enrichi pour obtenir un déplacement miscible. Pour cela des équations décrivant la détérioration

des bords du banc ont été développées par TAYLOR (34, 35, 36) et ARIS (37) pour l'écoulement dans des capillaires et étendues à l'écoulement en milieu poreux par VON ROSENBERG (38) et BLACKWELL, TERRY, RAYNE (39). Selon ces auteurs la longueur de la zone de mélange formée durant un déplacement miscible est donnée par l'équation :

$$\Delta L = 3{,}62 \sqrt{Kt}$$

K = coeff. de dispersion (cm2/sec.)
L = longueur (en cm) la portion est prise dans la zone de mélange entre 10 et 90 % de la valeur maximum
t = temps (en sec.) à partir du bord d'entrée du banc jusqu'à l'émergence à la concentration des 50 % de la valeur maximale.

Les calculs devant être faits pour les bords avant et arrière du banc, il faut prendre la moyenne car les coefficients de dispersion varient. Pour les injections sur un champ ces valeurs sont largement majorées afin de se mètre à l'abri de toute surprise.

- SLOBOD et KOCH déplacèrent plusieurs huiles par un gaz enrichi et un gaz pauvre (fig. 10).

La composition de ces gaz est :

Constituants	Gaz pauvre	Gaz riche
C_1	87,9	72,4
C_2	11,6	16,4
C_3	0,5	8,0
C_4		2,2
C_5		0,6
C_6		0,1
C_7^+		0,3

Comme pour l'influence de la pression, une composition adaptée du gaz injecté peut améliorer le rendement d'un déplacement même après l'obtention de la miscibilité. Car plus le gaz est riche en hydrocarbures intermédiaires plus sa viscosité est élevée ce qui favorise un meilleur balayage et la miscibilité est plus rapidement atteinte.

B- /INFLUENCES AFFECTANT LA DYNAMIQUE DU DEPLACEMENT/

Ces deux aspects de déplacements miscibles : pression et composition sont les principaux aspects physico-chimiques du problème. Mais ils sont cependant en relation directe avec les facteurs dynamiques du déplacement qui en conditionnent l'efficacité. Ces facteurs sont essentiellement :

- les forts contrastes de mobilité entre les fluides en place et injecté.
- leur différence de densité
- l'hétérogénéité du milieu poreux
- la vitesse d'avancement du front miscible
- la forme même du gisement.

1. Efficacité du balayage superficiel

L'aire balayée par les fluides d'injection au moment de leur arrivée aux puits de production ne dépend pas seulement de l'implantation des sondes, mais aussi du rapport des mobilités du fluide injecté et du fluide déplacé, en raisonnant bien entendu sur un réservoir plat, horizontal et homogène. Plus ce rapport sera élevé, c'est-à-dire plus la mobilité du fluide injecté sera grande par rapport à celle du fluide déplacé, plus l'aire drainée sera réduite.

Si l'on continue à injecter le fluide déplaçant après l'arrivée du gaz au puits producteur, l'aire balayée augmentera, mais à un rythme moindre, puisque la productinn comportera à la fois le fluide déplacé et le fluide déplaçant. Lorsque la proportion de fluide déplacé dans la production aura atteint une valeur telle que toute récupération ultérieure ne pourra plus être rentable, l'exploitation sera abandonnée. L'aire effectivement balayée au moment de l'abandon est considérablement affectée par le rapport de mobilité M des fluides en présence et dans le cas d'une disposition en "five-spot" ou en quinconce elle a l'aspect indiqué par la figure 13. Si des méthodes de calculs ou des procédés analogiques permettent de détecter l'efficacité du balayage en fonction de M pour des schémas d'implantation de puits de formes géométriques données, les déterminations théoriques et expérimentales de différents auteurs ne sont pas toujours en parfait accord. Nous donnons dans la figure 14 les résultats obtenus en "five-spot" par l'Atlantic Refining Company. Ils indiquent une efficacité de balayage au moment de l'abandon, voisines de 100 % pour des rapports de mobilité proches de l'unité ; c'est la cas de l'injection d'eau. Pour des valeurs de M variant entre 50 et 100, comme c'est le cas dans tous les procédés utilisant du gaz comme fluide déplaçant, cette efficacité est réduite à 70 % et même moins. C'est là un des inconvénients majeurs des déplacements miscibles qui ne sont souvent que trop insuffisamment compensés par l'efficacité quasi totale du balayage frontal. Dans bien des cas, en effet, la récupération finale du drainage miscible ne sera pas supérieure à celle de l'injection d'eau comme le montre la figure 15.

On peut déjà préciser que les déplacements miscibles par injection de gaz à haute pressinn se placent dans les cas les moins défavorables. Dans de tels déplacements, en effet, les pressions

élevées augmentent notablement la viscosité du gaz, en même temps que la richesse de l'huile en hydrocarbures légers réduit sa propre viscosité, ramenant ainsi le rapport de mobilité M à des valeurs plus favorables.

C'est pour cela que l'on a cherché à combiner l'efficacité de balayage superficiel de l'injection d'eau et celle du balayage frontal des déplacements miscibles. L'étude des déplacements par bouchon d'alcool est un aspect de cette recherche. Un autre aspect est fourni comme nous l'avons déjà cité par l'injection simultanée de gaz et d'eau derrière le bouchon miscible ce qui donne un mélange d'une mobilité voisine de celle de l'eau, plus proche de celle de l'huile que le gaz seul, tout en conservant la miscibilité du gaz et du bouchon d'hydrocarbures intermédiaires. Mais si le rapport de mobilité joue un rôle prépondérant dans l'importance de l'aire balayée, il convient de ne pas perdre de vue non plus l'influence de la forme et des dimensions du gisement, ainsi que celle de l'implantation des puits d'injection et de production sur l'efficacité réelle de ce balayage.

2. Digitations des écoulements visqueux

Le contraste de viscosité ne conduit pas seulement à de mauvais balayages superficiels ; il donne lieu, même dans un milieu poreux parfaitement homogène, à la formation de doigts qui pénètrent à l'avant du front d'avancement dans la masse du liquide le plus visqueux. L'importance de ces digitations varie, d'une part, avec le rapport de mobilité des deux fluides (fig. 16 et 17) et d'autre part avec la vitesse d'avancement du front miscible, c'est-à-dire avec le taux d'injection.

L'inconvénient majeur de ces digitations est un étalement de la zone de transitinn entre la région occupée par le banc de solvant et celle occupée par l'huile du réservoir. Il en résulte une sortie du solvant encore plus rapide, qui nécessite un plus grand volume de solvant. Les figures 18 et 19 résument les résultats obtenus par BLACKWELL, RAYNE, TERRY (40) dans leurs expériences sur différents modèles. Ces modèles sont constitués par un parallélépipède de la roche réservoir ; ils sont de dimensions différentes pour éliminer des erreurs systématiques dues à des effets de parois ou autres et qui ne se rencontreront pas dans le gisement étant donné ses grandes dimensions. L'écoulement des fluides s'effectue dans le sens de la longueur, le modèle posé horizontalement, ces écoulements sont appelés "écoulements parallèles". Ces expériences montrent l'influence du rapport de mobilité sur la récupération à la sortie du solvant, et sur la récupération cumulée en fonction des volumes de solvant injectés. Il s'agit bien là d'une réduction de récupération par suite des digitations et non par manque d'efficacité de balayage superficiel, en effet l'injection se faisant sur toute la section du modèle et l'écoulement étant parallèle le balayage superficiel intéresse nécessairement la totalité du modèle poreux.

En ce qui concerne l'influence de la vitesse d'avancement du front ces mêmes auteurs l'ont étudiée sur des modèles parallélépipèdiques de 0,95 cm d'épaisseur, de 183 cm de longueur et dont les largeurs étaient de 1,27 cm, 21,24 cm et 85 cm. Ils obtenaient ainsi des récupérations qui ne variaient pratiquement pas avec le taux d'injection, sauf pour le modèle le plus étroit. Leurs résultats sont indiqués figure 20 ; ils montrent aussi que la récupération est meilleure dans les modèles les moins larges. Un quatrième modèle de 0,95 x 21,24 x 63,72 cm leur a permis de vérifier que deux modèles

ayant des dimensions différentes mais dont les rapports de la longueur à la largeur étaient identiques se comportaient à peu près de la même façon du point de vue de la récupération.

Ils expliquent ces résultats par la forme et l'importance des digitations. Dans le réservoir étroit, les doigts de solvant qui s'amorcent dès le début de l'injection ne peuvent ensuite se développer considérablement en largeur leur expansion latérale étant rapidement limité par la répartition des pressions qu'entraînent la proximité des parois et celle des autres doigts de même importance. Pendant la progression du front, la diffusion moléculaire a alors largement le temps d'uniformiser les concentrations de fluides entre les doigts de solvant, perpendiculairement au sens de l'écoulement et de stabiliser ainsi la zone de transition longtemps avant la sortie du solvant.

Plus la vitesse d'avancement sera grande, plus les doigts seront longs et la diffusion moléculaire s'exerçant toujours à la même vitesse, la stabilité de la zone miscible sera obtenue après un parcourt plus grand. D'où des récupérations plus faibles comme le montrent les résultats expérimentaux de la figure 20.

Dans les modèles plus larges la formation des doigts est favorisée et se développe en largeur. Le solvant arrive à l'autre extrémité avant la formation d'une zone de transition stable, ce qui explique que la récupération à l'arrivée du solvant soit, d'une part faible, et d'autre part, qu'elle ne soit pratiquement pas influencée par les taux d'injection. Selon ces auteurs c'est ce qui se passerait à l'échelle du gisement. D'autres auteurs (41) pensent que les modèles réduits ne respectent pas les conditions de similitude avec le gisement. Un long cheminement du bouchon rend mieux compte du comportement du front miscible.

3. Hétérogénéité du milieu

Cette hétérogénéité peut se manifester sous plusieurs aspects. D'abord à l'échelle du gisement, sous forme de stratification, de lentilles ou de blocs dont la porosité et la perméabilité diffèrent. Contrairement à ce qui se passe dans une injection d'eau où les forces de capillarité favorisent l'entrée de l'eau dans les zones les moins perméables et tendent par suite à maintenir la régularité du front d'avancement, les mouvements de fluide miscible se feront essentiellement par les chemins de moindre résistance, et l'huile des zones plus compactes sera contournée et abandonnée d'autant plus facilement que le contraste de viscosité entre le gaz, le solvant et l'huile sera plus grand.

L'hétérogénéité du milieu se manifeste ensuite à l'échelle des pores et les cheminements préférentiels ou "channeling" qui en résultent favorisent et accentuent au sein de la roche la formation des digitations du fluide le moins visqueux dans la masse du fluide le plus visqueux, rendant ainsi le front miscible encore plus instable sa rupture possible et la récupération finale sérieusement diminuée.

4. Effet de la pesanteur

Les différences de densité entre l'huile en place et le gaz injecté vont jouer leur rôle dans l'efficacité des déplacements miscibles (42)

Dans le cas de gisements horizontaux ou à pendage faible, où les écoulements sont du type radial circulaire, l'effet de la pesanteur sera nuisible : le front miscible sera progressivement déformé par la ségrégation des fluides en présence, et les fluides les plus légers arriveront à cheminer dans les seules parties hautes du gisement, compromettant la récupération finale. Cet état de chose sera d'autant plus marqué que le contraste des densités sera plus grand, les perméabilités verticales meilleurs et le gisement plus épais.

Dans le cas de gisements à fort pendage où les puits d'injection seraient distribués dans le haut de la structure et ceux de production dans le bas, cet inconvénient disparaîtrait complètement (43, 44). La différence de densité présenterait même un avantage car elle stabilise le front d'avancement et réduit la zone de transition : la ségrégation agit en direction opposée à la croissance des doigts et empêche même leur formation si la vitesse d'avancement du front miscible est inférieure à une vitesse critique donnée par l'équation

$$v = \frac{q}{S} = k \frac{\Delta \rho}{\Delta \eta} \sin \alpha$$ établie théoriquement par HILL (45) et DIETZ (46) et vérifiée par BLACKWELL, RAYNE et TERRY (40)

v vitesse d'avancement

q débit

S Section offerte à l'écoulement

k la perméabilité

$\Delta \rho$ la différence de densités

$\Delta \eta$ la différence de viscosité

α l'angle de pendage.

De plus, la disposition des puits d'injection et des puits de production rend l'écoulement parallèle et améliore sensiblement l'efficacité du balayage.

5. <u>Nature de l'huile du gisement</u>

Enfin, il semble que la composition chimique de l'huile du gisement puisse dans certains cas réduire l'efficacité d'un drainage par fluides miscibles. En effet, si cette huile comporte des composants asphaltiques, sa solubilité dans les hydrocarbures légers, tels que le propane et le butane, sera sélective et il pourra se former des précipités asphaltiques très visqueux qui viendront réduire considérablement la liberté de mouvement des fluides et pratiquement colmater le milieu poreux.

11. CASANOVA J.
Revue IFP XV n°9 Septembre 1960 p. 1261

12. COOK A.B.
Seminaire de Reservoir Engineering
Publié par IFP Juin 1957

13. BENHAM A.L., DOWDEN W.E., KUNZMAN W.S
Petr. Trans AIME v.219 1960 p.229

14. COOK A.B.
Journal Petr. Tech. Mai 1957

15. BROWNSCOMBE E.R.
Oil and Gas Journal v.53 n°6 Juin 1954 p.133

16. GRIFFITH. B.L, HOLLRAH V.M.
Oil and Gas Journal v.51 n°8 Juin 1952 p.86

17. KERN L.R., KIMBLER O.K. WILSON R.
Journal Petr. Tech. v.10 n°5 mai 1958

18. SIEVERT J.A., DEW J.N, CONLEY F.R.
Petr. Trans AIME v.213 1958 p.228

19. HERBECK E.F, BLANTON J.R
Journal Petr. Tech. v.13 n°6 Juin 1961 p.543

20. Oil and Gas Journal
v.56 n°23 Juin 1958 p.70

21. HOCK R.L
Oil and Gas v.14 n°1 Juin 1955 P.55

22. Oil and Gas Journal
v. 58 n° 38 Septembre 1960 p.79

23. GRINSTEAD W.C, Jr, BARFIELD E.C
Journal Petr. Tech v.14 n°3 Mars 1962 p.261

24. DEFRENNE P., MARLE C., PACSIRSKY I. JEATET M.
Revue IFP XVI n°6 Juin 1961 P. 678

25. KOCH H.A, HUTCHINSON C.A.
Petr. Trans AIME V.213 1958 p.7

26. MAUL R.V., SMITH L.T
Pennsylvania State Univ. Mener Octobre 1961 p.123

27. SLOBOD R.L., KOCH H.A
Drill. Prod. Practice 1953 p.82

28. BROWNSCOMBE E.R.
Oil and Gas Journal Juin 1954 p.133

29. ZAKS S.L., SERGEEVIC V.I.
Neftanoe Khozjajstvo Novembre 1961 p.36

30. KEHN D.M, PYNDUS G.T., GASKELL M.H
Journal Petr. Tech. Juin 1958 p.45

31. WHORTON L.P, KIESCHNICK W.F.
Drill. Prod. Practice 1950 p.247

32. STONE H.L., CRUMP J.S
Petr. Trans AIME v.207 1956 p.105

33. ARNOLD C.W., STONE H.L., LUFFEL D.L.
Petr. Trans AIME v.219 1960 p.305

34. TAYLOR G.
Proc. Roy. Soc. (London 1953) v. A 219 p. 186

35. TAYLOR G.
Proc. Roy. Soc.(London 1954) v. A 223 p. 446

36. TAYLOR G.
Proc. Roy. Soc.(London 1954) v. A 225 p. 473

37. ARIS R.
Proc. Roy. Soc.(London 1957) v. A 235 p.62

38. ROSEMBERG D.V
A.I.Ch.E. Journal n°2 1956 p.55

39. BLACKWELL R.J., RAYNE J.R., TERRY W.M
Petr. Trans AIME v.216 1959 p.1

40. BLACKWELL R.J., RAYNE J.R., TERRY W.M
Petr. Trans AIME v. 216 1959 p.1

41. SLOBOD R.L., BURCIK E.J., CASHDOLLAR B.H
Prod. Monthly v. 23 n°8 Juin 1959 p.12

42. GARDNER G.H., DOWNIE J., KENDALL H.A
Soc. Petrol. Eng. Journal v.2 n°2 Juin 1962 p.95

43. BUCKLEY S.E, LEVERETT M.C
Petr. Trans AIME V.146 1942 p.107

44. PERKINS F.M. Jr
Journal Petr. Tech. V.9 n°10 Octobre 1957 p.281

45. HILL S.
Chem. Eng. Sci. v.1 n°6 1952 p.246

46. DIETZ D.N
Proc. Acad. Sci. Amsterdam B n°56 1953 p.83

V - DEPLACEMENT DU BRUT DE LACQ SUPERIEUR PAR INJECTION DE BUTANE LIQUIDE -

Dans un premier temps, afin de mettre au point nos méthodes dans des conditions de pression et température moins sévères que dans le cas des huiles sahariennes, nous avons simulé la récupération du brut de Lacq Supérieur, par injection de butane liquide. Le balayage était effectué dans les conditions de température et de pression du gisement à l'intérieur d'un milieu poreux artificiel, dans un dispositif permettant l'observation visuelle des phénomènes.

A - /APPAREILLAGE/

Le coeur du système est constitué par le milieu poreux et l'enceinte dans laquelle il se trouve.

- Le milieu poreux est constitué par des billes de verre d'un diamètre de 1,4 mm ; sa porosité est de 38 %
- Les billes de verres sont contenues dans un tube de pyrex "haute pression", d'épaisseur 5 mm et de diamètre intérieur 15 mm, la longueur utile étant de 300 mm. Aux extrémités de ce tube sont placés deux embouts, représentés par la figure 21 et qui permettent d'obtenir l'étanchéité sur la paroi latérale du tube au moyen de deux joints toriques. Ils permettent de raccorder le milieu poreux au reste de l'appareillage au moyen de tubes métalliques pour haute pression. Les deux embouts sont reliés entre eux par un tube fileté entourant le tube pyrex, dans lequel ont été ménagé deux ouvertures de 240 mm de longueur, diamétralement opposées de manière à pouvoir observer le processus de déplacement.

L'ensemble de ces pièces (fig. 22) constituant le milieu poreux et son support est placé dans une enceinte thermostatée régulée par des relais en cascade agissant sur les résistances, commandéespar thermomètre à contact.La précision obtenue sur la température est de 1/5 de degré C.

Le reste de l'appareillage se raccordant au milieu poreux peut se diviser en 3 parties :

a) Alimentation du milieu poreux en brut

Le brut de Lacq se trouve dans une cellule haute pression de 380 cm^3 qui est reliée :

- par le haut au milieu poreux
- par le bas à une pompe volumétrique à mercure avec laquelle on injecte du mercure qui pousse le brut à l'intérieur du milieu poreux. On connaît ainsi au 1/100 de cm^3 près le volume de brut injecté sous pression. Cette cellule se trouve avec le milieu poreux dans l'enceinte thermostatée.

b) Injection du butane

Le butane se trouve à l'intérieur d'une cellule à fenêtres reliée par le bas à une cellule contenant du mercure, elle-même reliée à une bouteille d'air comprimé de 50 litres de capacité, par l'intermédiaire d'un détendeur. La cellule de mercure sert de tampon entre le butane et l'air afin que celui-ci ne se mélange pas au butane. C'est l'air comprimé qui, détendu à la pression d'utilisation, pousse le butane à travers le milieu poreux. La cellule à fenêtres a été étalonnée afin de pouvoir mesurer le volume de butane injecté par visée du niveau de l'interface butane mercure à l'aide d'un cathétomètre au 1/50 de mm.

c) Récupération du brut déplacé

Cette partie ayant été différente suivant le mode d'injection étudié sera traitée par la suite.

B - EXPERIENCES DE DEPLACEMENT

Dans les déplacements que nous avons effectués il a été utilisé de l'eau et du brut de Lacq. Les compositions et caractéristiques de ce brut sont données par l'analyse pétrolière :

	% Masse
- Constituants huileux (hydrocarbures)	65,4 %
- Résines (constituants oxygènes à haut poids moléculaire séparés sur colonne adsorbante	11,6 %
- Asphaltènes (constituants à haut poids moléculaire, précipités par l'acétate d'éthyle)	23 %
- Densité	0,93 g/cm^3
- Température	57 ° C
- Pression	55 bars.

Le remplissage du milieu poreux s'effectue comme suit :

- remplissage avec l'eau par le bas du milieu poreux afin d'éviter la présence d'air piégé et de se rapprocher le plus possible des conditions de gisement.
- l'eau était chassée par le brut de Lacq injecté par le haut à l'aide d'une pompe volumétrique à mercure. Une fois le milieu poreux rempli de brut on effectuait la mise en chauffe et en pression de manière à se trouver dans les conditions de puits : 55 bars et 57° C. Le butane était mis en pression à 55 bars à l'aide de l'air comprimé puis mis en communication avec le milieu poreux.

Deux sortes de déplacement ont été étudiées :

1. Injection de butane par le haut du milieu poreux

a) Description

Ce déplacement a été réalisé en premier, car c'est celui qui remplit les conditions les plus favorables pour déplacer régulièrement toute l'huile. En effet, le butane est plus léger et beaucoup moins visqueux que le brut à déplacer. Du fait de l'injection par le haut, on avait toutes les chances d'éliminer les effets de diffusion et de cheminement du butane à travers le brut. Malgré certaines difficultés techniques dues surtout à la mauvaise tenue du tube de verre à une pression aussi élevée, plusieurs déplacements de ce type ont pu être réalisés, au cours desquels nous avons pu obtenir de très bonnes récupérations, et observer visuellement le phénomène. Le montage utilisé est celui montré figure 23.
Le brut récupéré sortant du milieu poreux est envoyé dans une cellule à fenêtres pour suivre son évolution et mesurer le volume d'huile récupérée par visée de l'interface mercure-brut. La vitesse d'écoulement était réglée en laissant échapper le mercure se trouvant entre la pompe volumétrique et le bas de la cellule à fenêtres contenant le brut récupéré ; ainsi on obtenait des débits constants, ce qui n'a pu être obtenu dans l'autre série d'expériences car le débit se faisait en laissant échapper l'huile, laquelle évoluait au cours de l'expérience. Le butane servant au déplacement est du butane commercial de composition :

Hydrocarbures	% Volume
C_2	traces
C_3	6,10
i C4	31,70
n C4	61,70
C_5	0,50

b) Expérimentation et résultats

L'observation visuelle a permis de constater que l'huile était déplacée sous l'effet de piston créé par le butane,la surface de séparation étant horizontale. Seule une zone de diffusion de 1 à 2 mm d'épaisseur apparaissait à l'interface, due à la miscibilité entre l'huileet le butane. Mais la faible longueur du milieu poreux ne nous a pas permis de voir son évolution.

Une première expérience a été réalisée à vitesse variable, qui a laissé sur le milieu poreux balayé des zones plus ou moins sombres. Les zones les plus claires, donc les mieux balayées, correspondant aux vitesses les plus faibles.

Deux autres déplacements ont été conduits à des vitesses constantes de 5,5 cm/heure et 4,2 cm/heure et dans ces deux expériences le taux de récupération était supérieur à 99 % pour un volume de butane injecté égal au volume de l'huile en place. Après le balayage et l'évaporation du butane se trouvant dans le milieu poreux, celui-ci était nettoyé et le résidu obtenu après évaporation du solvant pesé et analysé pour obtenir le pourcentage d'asphaltènes. Dans les 2 cas le poids du résidu était très faible (0,15 et 0,10 g) comparé au 25 g d'huile en place avant l'expérience. Quant aux asphaltènes, les taux étaient de 48 % et 40 %, pourcentages nettement supérieurs au 23 % du brut, ce qui laisserait supposer que plus la vitesse de déplacement est rapide, plus le taux d'asphaltènes précipité est important. Ceci est très important, car dans une roche réservoir beaucoup moins poreuse, cette précipitation pourrait obturer les pores.

2. Injection de butane par le bas du milieu poreux

a) Mise en place

Dans ce cas de déplacement il était prévisible que le butane moins dense et moins visqueux que le brut à déplacer se comporterait différemment que dans le cas de déplacement avec injection par le haut : a priori on pouvait penser que le butane se mouvrait à travers l'huile du milieu poreux, soit qu'il donnerait une zone miscible plus importante et d'une formation plus rapide que dans le cas précédent. D'où la nécessité pour étudier ce déplacement de réaliser une étude du rapport des volumes gaz sur huile (G.O.R.) produits tout au long de la récupération.
Pour cela il a fallu modifier la partie récupération de l'appareillage (figure 24).

Sur le tube haute pression de sortie du milieu poreux, après deux vannes servant à laminer l'effluent pour régler le débit, sont placés un piège gradué et un ballon jaugé reliés à un manomètre à mercure. Ce montage représenté figure 24 permet d'avoir pour chaque volume d'huile récupéré le volume gazeux (de butane) correspondant. Connaissant la pression dans le piège et le ballon il est facile de déterminer le volume gazeux correspondant au volume d'huile récupéré dans le piège.

Le remplissage du milieu poreux s'effectuait comme dans le cas précédent, ainsi que la détermination du volume du brut en place dans le milieu poreux.

b) Description

Plusieurs expériences de déplacement de ce type ont été réalisées, la principale difficulté rencontrée étant la quasi impossibilité de réglage du débit d'une manière continue et régulière. En effet, le débit est réglé directement sur l'huile récupérée, laquelle devient de moins en moins visqueuse au fur et à mesure de la production. De ce fait, le débit, qui est inversement proportionnel à la viscosité devient de plus en plus grand. Il est nécessaire de modifier le réglage tout au long de l'opération et on peut se rendre compte des variations de débit d'après la courbe d'injection du butane en fonction du temps (figure 25).

L'observation visuelle du déplacement a été beaucoup plus difficile à observer que dans le cas précédent, étant donné l'opacité du brut et le fait que l'efficacité du déplacement est plus faible, le brut restant rendant le système presque complètement opaque. Il a été cependant possible grâce à un éclairage puissant et à l'emploi de rayons ultra-violets de se représenter le phénomène.

Au début de l'expérience le butane qui est introduit par le centre du milieu poreux montait à l'intérieur du tube. Le déplacement se propageait du centre vers l'extérieur du milieu poreux suivant une parabole allongée. Lorsque le butane atteignait les bords du tube,on observait un écoulement préférentiel le long des parois à cause de la plus faible porosité, ce qui a probablement empêché un balayage plus complet du milieu poreux.

c) Résultats

Les résultats des déplacements peuvent être représentés
- par les courbes de G.O.R. au cours de la récupération
- par les courbes de récupération en fonction du volume de butane injecté
- par les courbes d'évolution de la composition de l'huile déplacée au cours de l'expérience.

Les G.O.R. (figures 26 et 27) sont déterminés en relevant comme indiqué précédemment, pour un volume d'huile récupéré à un instant donné , la pression du gaz qui permet de déterminer le volume et le volume de butane injecté.

Les courbes ainsi déterminées montrent la présence du butane presque dès le début du déplacement. La concentration en butane augmente de plus en plus au cours du déplacement et tend à devenir du butane seul à la fin. Les expériences ont été arrêtées lorsque le G.O.R. atteignait des valeurs croissant très rapidement, de l'ordre de 600 à 800.

Les taux de récupération ont été au cours de ces déplacements dans le sens ascendant de 80 à 85 %. La courbe de récupération de l'huile

en fonction du volume injecté (fig. 28) reste tangente à la droite de la pente 1 (récupération idéale) jusqu'au milieu du déplacement, à la fin de l'expérience il a été injecté 1,5 volume de butane pour récupérer 1 volume de brut. (Les taux de récupération sont calculés d'après le volume du brut mis en place et celui restant après le déplacement).

L'évolution de la composition de l'huile (fig. 29) au cours du déplacement a été suivie en mesurant le pourcentage d'asphaltènes de l'effluent. Au début on part du brut (23 %) puis on observe une chute rapide jusqu'à une composition constante de 7 à 8 % avant une diminution très rapide à la fin de l'expérience.

c) Conclusions

D'après les expériences réalisées au laboratoire sur la récupération du brut de Lacq Supérieur par injection de butane liquide, nous pouvons dire que le procédé est très efficace puisque dans le cas le plus défavorable le taux de récupération est supérieur à 80 %.

Nous pouvons dire que le déplacement est miscible :

- parce que le brut doit être directement miscible avec du gaz de pétrole liquéfié d'après le diagramme
- à cause de l'évolution constante de l'effluent qui passe du brut en place au butane injecté.

Ceci est montré par les courbes de G.O.R. et de variation du pourcentage d'asphaltènes. Cette dernière présente une cassure, probablement parce que le chemin parcouru n'est pas suffisant pour que la zone miscible se forme entièrement, elle est cependant très bien formée à l'avant et à l'arrière.

- à cause du très bon rendement qui rappelle ceux obtenus dans la littérature.
- un autre phénomène nous montre que ce déplacement est miscible : c'est le fait qu'au cours d'un déplacement, il était resté de l'eau dans le tube lors du remplissage et que cette eau a été retrouvée à la même

place en fin d'expérience. L'eau non miscible au butane liquide n'a pas été touchée alors que le brut a été déplacé.

Cette étude montre qu'on pourrait théoriquement envisager la récupération secondaire du gisement de Lacq supérieur. Malheureusement, entre autres inconvénients le fait que le réservoir soit coupé de nombreuses faibles rend impossible une telle entreprise.

VI - ETUDE D'UNE HUILE SAHARIENNE - DETERMINATION DES CONDITIONS DE MISCIBILITE -

A la suite des expériences de déplacement du brut de Lacq Supérieur et afin d'atteindre le but que nous nous étions fixé : la détermination des conditions d'un déplacement miscible des huiles du Sahara, nous avons effectué sur une huile saharienne une étude qui nous a permis de construire le diagramme pour cette huile dans les conditions de gisement.

A - /APPAREILLAGE/

L'appareillage utilisé pour l'étude des équilibres huile-gaz est montré fig. 30 et comprend :

1 - 4 Cellules haute pression A, B, C, D d'une contenance de 380 cm^3

- A contient l'huile à étudier
- B contient le gaz à injecter dans cette huile
- C et D, remplies au départ de mercure serviront à recueillir le gaz et l'huile de l'équilibre réalisé.

2 - Une cellule de mélange d'une contenance de 500 cm^3 et munie à sa partie supérieure d'une cellule à fenêtres permettant d'observer visuellement les déplacements et repérer les interfaces pour mesurer les volumes lors des transferts. Au départ, cette cellule contient du mercure et des billes de verres. Les billes de verres favoriseront le mélange du gaz injecté par le bas et de l'huile en place.

3 - Un bain d'air thermostaté de grandes dimensions, muni sur deux faces de fenêtres permettant d'éclairer et de voir l'ensemble des cellules qu'il contient. La température désirée est régulée à l'aide d'un thermomètre à contact, donnant une précision du 1/5 de degré C.

4 - Les mesures volumétriques au cours des opérations d'injection, de mise en pression, de transfert ainsi que les compensations des variations de volume en cours d'expérience sont effectuées à l'aide de deux pompes volumétriques I et II. Une pompe volumétrique (fig. 31) est constituée essentiellement par un piston de 280 mm de longueur, d'une section de 10 cm^2 se déplaçant dans une chambre contenant le mercure. L'étanchéité entre la chambre et le piston coulissant est assurée par un joint présseré, de sorte que le volume déterminé est indépendant de la pression. Le

piston est manoeuvré par une vis de pas 3 mm, (un tour correspond donc à un déplacement de 3 cm^3 de mercure), elle-même entraînée à la main par un volant sur lequel est fixé un disque gradué en 300 divisions donnant une précision de 1/100 de cm^3 par division. Sur la vis solidaire du piston est fixé un index se déplaçant devant une règle millimétrique qui donne les déplacements volumétriques en cm^3. L'ensemble des éléments de la pompe est placé dans un bain d'huile thermostaté permettant d'éviter les variations de pression liées aux fluctuations de la température ambiante.

5 - Mesures des pressions

Les mesures de pression se font de façon grossière à l'aide de manomètres du type Bourdon à volume pratiquement constant.

Les mesures précises sont obtenues en utilisant des balances de pression (fig. 31) dont le principe est le suivant : la force exercée par des poids connus et étalonnés sur un piston "libre" baignant dans un fluide (huile) crée à l'intérieur de ce fluide la pression hydrostatique désirée. Mais le déplacement de ces pistons libres a le désavantage de ne plus rendre la mesure volumétrique. Celle-ci est rendue volumétrique en fixant avec toute la précision possible l'interface mercure-fluide de balance. Pour ce, on utilise un séparateur ayant au niveau de l'interface une section très faible ; un contact électrique se refermant sur le mercure en assure le positionnement. On maintient le contact à l'interface en injectant ou soutirant de l'huile dans la balance, de sorte que le niveau (donc le volume) de mercure demeure constant au 1/20 mm près. L'incertitude sur le volume est alors de quelques mm^3.

L'ensemble des appareils est interconnecté au moyen de tubes à haute pression et de vannes (numérotées de 1 à 14 sur la figure 30) qui permettent d'effectuer toutes les opérations dont les principales se déroulent comme suit :

- injection d'huile pousséepompe II, retrait pompe I avec les vannes 7, 10, 5, 3 ouvertes
- injection de gaz :poussée pompe I, retrait pompe II avec les vannes 2, 11, 4, 6 ouvertes
- recueil de l'huile après équilibre : poussée pompe II, retrait pompe I, avec les vannes 3, 9, 8 ouvertes.

- recueil du gaz poussée pompe II, retrait pompe I avec les vannes 6, 12, 1 ouvertes

D'autre part, afin d'obtenir tous les résultats nécessaires sur les échanges huile-gaz il est nécessaire de connaître les masses volumiques de ces fluides et leurs compositions. Pour cela nous avons utilisé des "cellules de densité" et l'analyse par chromatographie en phase vapeur.

6 - "Cellules de densité"

Elles ont été conçues spécialement pour déterminer avec le plus de précision possible les masses volumiques des fluides en température et pression. Pour cela elles répondent à deux impératifs : supporter des pressions jusqu'à 500 bars et avoir un poids inférieur à 1000 grammes, pour permettre des pesées avec une précision du 1/10 mg. Ces cellules sont munies de joints écrasés qui contrairement aux joints autoserreurs ne donnent aucune variation de volume avec la pression. Leur volume est déterminé par pesées : d'abord vide et ensuite remplie d'eau dans les conditions de température et pression de la mesure à effectuer.

7 - Chromatographie en phase vapeur

a) Description

Un appareil de chromatographie se présente en principe selon le schéma (fig. 32) et se compose essentiellement :

- d'une chambre d'introduction
- d'une colonne de séparation
- d'un détecteur, avec amplificateur et enregistreur
- d'une source de gaz vecteur destiné à entraîner l'échantillon avec mesure de débit et régulation de ce gaz vecteur
- d'un montage permettant la collecte des fractions à la sortie du détecteur (éventuellement).

Gaz vecteur:en général contenu dans une bouteille à pression élevée munie d'un détendeur pour obtenir un débit constant. On utilise l'azote, l'hydrogène, l'hélium, l'argon.

Chambre d'injection : l'échantillon n'est pas introduit directement dans la colonne. On utilise généralement une seringue.

Colonnes : en sortant de la chambre d'injection le gaz vecteur pénètre dans la colonne. Ces colonnes en tube d'acier inoxydables ou de cuivre ont un diamètre de 3 à 6 mm pour des longueurs ne dépassant guère une dizaine de mètres.

Détecteur :

Principe : Un courant d'intensité constante parcourt un élément sensible à la température (fil de tungstène, parfois de platine placé dans le flux gazeux). Quand l'équilibre entre l'apport d'énergie par effet Joule et la dissipation par rayonnement et surtout par conduction est atteint l'élément sensible se trouve porté à une certaine température. Celle-ci est donc fonction de l'intensité du courant, du débit du gaz et de la conductibilité thermique du milieu gazeux et évidemment des autres pertes d'énergie.

L'arrivée d'un soluté élué dans la colonne chromatographique modifie la conductibilité thermique du milieu gazeux (à condition que les coefficients de conductibilité de ce soluté et du gaz porteur soient différents). Dans ces conditions, l'équilibre thermique étant modifié, il y a variation de température de l'élément sensible et par conséquent de sa résistance électrique.

Réalisation : Pour enregistrer ces variations de température on insère l'élément sensible dans un pont de Wheatstone. Pour éliminer au maximum les influences des facteurs autres que la conductibilité thermique du flux gazeux, on place un second élément identique au premier baignant dans le gaz porteur, dans une autre branche du pont : on obtient ainsi les cellules dites de mesure et de référence l'ensemble des deux étant placé dans un bloc métallique isolé.

Si aucun soluté ne passe dans la cellule de mesure, le pont de Wheatstone est équilibré, le passage d'un soluté dilué dans le gaz vecteur provoque le déséquilibre du pont. La tension qui en résulte est envoyée à un amplificateur qui retransmet les variations à un enregistreur.

b) Analyse

Un soluté introduit en tête de colonne, parcourt celle-ci à une certaine vitesse qui dépend de la vitesse linéaire du gaz porteur et des propriétés propres du soluté vis-à-vis de la phase fixe (à l'intérieur de la colonne). Après un certain temps le soluté émerge donc de la colonne suivant un régime de concentration idéalement gaussien et l'on nomme volume de rétention la quantité de gaz porteur qui s'est écoulée dans la colonne depuis l'entrée du soluté jusqu'à sa sortie. Le volume de rétention est une caractéristique du soluté en question.

Ce volume de rétention peut être déterminé pour chaque constituant d'un soluté à partir du chromatogramme (fig. 32), les distances mesurées sur le papier enregistreur étant proportionnelles au temps.

Pour le constituant R, on a $t_R = \frac{dR}{u}$ ou u est la vitesse de déroulement du papier.

Si l'on appelle D_s le débit gazeux à la sortie de la colonne les volumes de rétention sont :

$$V_R = D_s\, t_R = D_s \frac{dR}{u}$$

Mais tout cela suppose que d'une part l'introduction de soluté se fait rigoureusement à l'entrée de la colonne et sa détection à la sortie exacte de celle-ci, d'autre part que la vitesse linéaire du gaz porteur V est la même en tous points de la colonne. En pratique, ceci n'est pas réalisé ; il y a toujours un certain volume mort, dont il faut tenir compte et la colonne entraîne une perte de charge créant un gradient de vitesse. Il faut donc apporter des corrections. Le volume mort est mesuré par le volume $V_m = D_s \frac{dm}{u}$ de rétention de l'air, car l'air ne subit aucune rétention par la phase stationnaire. On définit le volume de rétention réduit pour le constituant R

$$V'_R = V_R - V_m = D_s \left(\frac{dR - dm}{u}\right)$$

Pour tenir compte de la variation de la vitesse V du gaz porteur on applique un coefficient de perte de charge

$$j = \frac{3\,(P_e/P_s)^2 - 1}{2\,(P_e/P_s)^3 - 1}$$

avec P_e = pression d'entrée de la colonne

P_s = pression de sortie de la colonne

P_e et P_s exprimées en bars.

ce qui donne le volume de rétention absolu :

$$(V_R^o)' = V_R^o - V_m^o = j\,(V_R - V_m) = j\,D_s\,(d_R - d_m)\,/\,u$$

Ce dernier peut-être rapporté à l'unité de masse de phase fixe et à 0°C, donnant le volume de rétention spécifique :

$$V_g = (V_R^o)' \times \frac{273}{m \times T_c}$$

m = masse de phase stationnaire dans la colonne en g

Tc la température de la colonne en °K

On peut ainsi déterminer pour chaque hydrocarbure son volume de rétention et les déterminer facilement sur le chromatogramme (fig. 33). Pour avoir une analyse quantitative on a une proportionnalité entre la concentration du constituant de l'échantillon et la surface du pic (qui est une courbe de Gauss). Avec l'appareillage dont nous disposions, la surface de ce pic était obtenue par intégration automatique. La proportionnalité entre la surface des pics et la concentration de constituant est déterminée à partir d'un mélange d'hydrocarbures, dont la composition est parfaitement connue. Donc en multipliant chaque surface par le facteur correspondant on obtient l'analyse volumétrique du mélange gazeux à étudier.

B - /EXPERIENCES/

En vue de construire le diagramme ternaire représentant les échanges huile de gisement-gaz nous l'avons divisé en 3 zones, suivant la composition du gaz injecté. Dans chaque zone nous avons étudié les évolutions de l'huile de gisement et du gaz au contact duquel elle se trouve. Les études ont porté sur :

- la zone "gaz vaporisant l'huile" en utilisant un gaz pauvre en hydrocarbures intermédiaires
- la zone "gaz se condensant dans l'huile" en utilisant un gaz riche en hydrocarbures intermédiaires
- la détermination du point critique.

1 - Zone "Gaz vaporisant l'huile"

Le gaz G_1 utilisé est du gaz de Lacq profond épuré de composition :

Constituants	% Volume
N_2	0,68
C_1	96,70
C_2	2,39
C_3	0,23

ses principales caractéristiques qui nous seront nécessaires sont sa masse moléculaire (16,51) et son facteur de compressibilité isotherme à 100° C et 197,15 bars (0,940).

Ce gaz d'après sa forte teneur en méthane, va se situer à proximité du sommet C_1 du diagramme ternaire.

Ce gaz va être injecté dans de l'huile du Sahara, et nous étudierons ses enrichissements successifs, ainsi que l'évolution de l'huile qu'il aura traversé. Cette étude a été faite en 5 étapes : la première en injectant ce gaz dans de l'huile de gisement, le gaz recueilli à l'équilibre une fois mesuré et analysé sera injecté en une deuxième

étape dans de l'huile vierge et ainsi de suite jusqu'à obtenir un gaz très proche de l'enrichissement maximum.

A titre d'exemple nous allons décrire la première étape et ses résultats. Les autres expériences étant réalisées d'une manière identique, nous n'en donnerons que les résultats.

a) Première étape - Description de l'expérience et des calculs

Le volume d'huile injecté dans la cellule de mélange dans les conditions de fond est 113,30 cm^3. Dans cette huile nous allons injecter le gaz G1 (dans les conditions de fond) par petites quantités pour pouvoir suivre l'évolution de l'huile : saturation et variations de volume.

Nous donnons dans le tableau 1 le relevé des mesures faites au cours de l'expérience :

TABLEAU 1

Lecture pompe d'injection cm^3	Volume de gaz injecté cm^3	Lectures pompe de retrait cm^3	Variation de volume dans la cellule de mélange cm^3
138,31	0	280,83	0
148,31	10,00	226,97	3,86
158,31	20,00	223,13	7,70
166,73	28,42	217,94	12,89
169,23	30,92	saturation pt de bulle 216,22	14,61
172,30	33,99	214,32	16,51
185,33	47,02	203,08	27,75
206,39	68,08	181,52	49,31
emplissage de 250,13	111,82	140,30	90,53
a pompe en mer- 76,97			
ure 135,86	170,71	84,36	146,47
193,61	228,46	vidange du 28,65	202,18
221,99	256,84	mercure de la 94,23 pompe 68,59	227,82

Il a été injecté 256,84 cm^3 de gaz G_1 en 11 injections, chaque lecture de mesure étant faite après l'obtention de l'équilibre (une heure environ après injection, et en réajustant la pression pendant la durée de l'équilibrage. Lorsque tout le gaz est injecté on effectue pour favoriser les échanges plusieurs brassages du mélange gaz-huile, en faisant passer le gaz et l'huile dans une cellule ne contenant que du mercure et en les ramenant dans la cellule de mélange. Lorsque l'équilibre est atteint (plus de variation de pression) on sépare et recueille les deux phases en présence, en effectuant les opérations décrites dans la partie appareillage.

La phase gazeuse G_2 est déplacée dans la cellule de recueil. Son volume est mesuré entre la lecture de départ et celle où apparaît l'huile au sommet de la cellule à fenêtres. Le volume de gaz recueilli, dans les conditions de l'expérience est : 254,90 cm^3.

La phase liquide H_2 a un volume de 82,05 cm^3, mesuré entre la lecture de départ et l'apparition du mercure au sommet de la cellule à fenêtres.

RESULTATS

. Courbe de variation de volume (figure 34)

A l'aide des mesures volumétriques effectuées en cours de manipulation et des volumes de gaz et d'huile obtenus à l'équilibre, nous pouvons tracer une courbe de variation des volumes en fonction du volume de gaz injecté. Cette courbe nous montre :

- un gonflement de l'huile jusqu'à la saturation, égal à 13 % du volume de l'huile en place
- après la saturation, le volume d'huile va diminuer car elle va céder des composants intermédiaires au gaz, comme va nous le montrer l'analyse du gaz, tandis que le volume de gaz va augmenter régulièrement. A la fin de l'expérience le volume d'huile n'est plus que 72,5 % du volume initial.

. Analyse du gaz

Dans la cellule contenant le gaz recueilli, une faible quantité est prélevée par purge directe pour passer au chromatographe en phase gazeuse. Cet appareil nous donne une analyse graphique du gaz à étudier où la surface

de chaque pic représentant un constituant est proportionnelle à la teneur de ce constituant dans le gaz. L'analyse volumétrique du gaz G_2 est :

Constituants	% Volume
C_1	86,08
N_2	0,34
C_2	6,53
C_3	3,23
iC_4	0,47
nC_4	1,75
iC_5	0,35
nC_5	0,59
C_6	0,65
C_7	traces

Le point représentatif de G_2 est déterminé sur le diagramme ternaire par les coordonnées :

	C_1	86,42
G_2	C_m	11,99
	C_5^+	1,59

. Mesure du facteur de compressibilité isotherme Z du gaz

Cette mesure nous est indispensable pour déterminer le poids du gaz injecté ou recueilli.

Le facteur de compressibilité isotherme Z est défini par le rapport $Z = \left(\frac{PV}{Po\ Vo}\right)_T$ où P et V sont les pression et volume d'une certaine quantité de gaz à la température T, et Vo est le volume de la même quantité de gaz à la même température T et à une pression suffisamment faible pour que le gaz puisse être considéré comme parfait (pression voisine de la pression atmosphérique. La mesure est effectuée en prélevant un volume V de gaz à la pression et température de l'expérience (197,15 bars et 100° C), et en détendant ce gaz à pression atmosphérique dans des ballons jaugés. Ce dernier volume sera ramené par calcul à 1 atmosphère et 100°C.

Lorsque le gaz est trop riche et risque de se condenser, la valeur de Z sera obtenue d'après les courbes de EILERTS (47) donnant le facteur de compressibilité en fonction de la densité du gaz par rapport à l'air.

- Calcul de la composition du point figuratif M_2 du mélange $G_1 + H_1$

Ce point est celui de la composition théorique du mélange G_1 et H_1 qui existerait s'il se trouvait en dehors de la région diphasique. C'est ce mélange M_2 qui va se dissocier à l'équilibre en une partie gazeuse G_2 et une partie liquide H_2.

Pour déterminer ce point il faut connaître les masses respectives de l'huile et du gaz ainsi que leur composition. En les additionnant, on aura la masse de chaque constituant dans le mélange.

- Masse de l'huile -

On connaît le volume injecté : 113,20 cm3, on détermine la masse volumique de l'huile dans les conditions de l'expérience en pesant une cellule de volume connu vide et pleine d'huile. La valeur obtenue étant de 0,943 ,la masse d'huile est : 113,20 x 0,943 = 72,7876 g. Pour avoir la masse de chaque constituant on multiplie la masse de l'huile par le pourcentage en masse de chaque constituant dans l'huile :

TABLEAU 2 -

% Masse		Masse de chaque constituant en g.
C_1	3,24	2,3583
N_2	0,60	0,4367
CO_2	0,05	0,0364
C_2	5,20	3,7850
C_3	7,09	5,1606
iC_4	1,22	0,8880
nC_4	4,69	3,4137
iC_5	1,61	1,1719
nC_5	3,30	2,4020
C_6	4,50	3,2755
C_7^+	68,50	49,8595

- Masse de gaz -

Pour déterminer la masse de gaz injecté, on utilise l'équation d'état des gaz réels :

$$PV = \frac{m}{M} Z RT$$

où P est la pression

V le volume de la masse m de gaz

R la constante des gaz parfaits

T la température absolue

Z le facteur de compressibilité

M la masse moléculaire moyenne. M est déterminé d'après l'analyse volumétrique : si v_i est le % en volume du constituant i et M_i sa masse moléculaire.

$$M = \sum vi\ M_i$$

P = 197,15 bars

V = 254,90 cm3

Z = 0,940

R = 83,1417

T = 373,16° K

d'où

$$m = \frac{16,51 \times 197,15 \times 256,84}{0,940 \times 83,1417 \times 373,16} = 28,6667 \text{ g}$$

La répartition en masse des constituants du gaz est obtenue à partir du pourcentage en volume donné par l'analyse chromatographique :

soit : m_i le % en masse du constituant i, v_i son % volume, V_i son volume molaire et M_i sa masse moléculaire.

On a : $$m_i = \frac{v_i \times \frac{M_i}{V_i}}{\sum v_i \frac{M_i}{V_i}} \times 100$$

La masse de chaque constituant dans le gaz est : m_i x 28,6667, soit pour chaque constituant :

- TABLEAU 3 -

	v_i	m_i	Poids en g.
C_1	96,70	93,83	26,8980
N_2	0,68	1,15	0,3297
C_2	2,39	4,39	1,2584
C_3	0,23	0,63	0,1806
			28,6667

- Masse et composition du mélange -

En additionnant la masse de chaque constituant dans l'huile et dans le gaz on obtient la masse de chaque constituant dans le mélange , on en tire la concentration massique puis le pourcentage en volume v_i de la manière suivante ;

$$v_i = \frac{m_i \times \frac{V_i}{M_i}}{\sum m_i \frac{V_i}{M_i}} \times 100$$

- TABLEAU 4 -

Constituants	H_1	G_1	M_2	M_2 % poids	M_2 % Vol.
	Poids de chaque constituant				
C_1	2,3583	26,8980	29,2563	28,84	73,65
N_2	0,4367	0,3297	0,7664	0,76	1,11
CO_2	0,0364	/	0,0364	0,04	0,04
C_2	3,7850	1,2584	5,0434	4,97	6,71
C_3	5,1600	0,1800	5,3412	5,26	4,77
iC_4	0,8880	/	0,8880	0,88	0,60
nC_4	3,4137	/	3,4137	3,36	2,28
iC_5	1,1719	/	1,1719	1,15	0,62
nC_5	2,4020	/	2,4020	2,37	1,29
C_6	3,2755	/	3,2755	3,23	1,47
C_7^+	49,8595	/	49,8595	49,14	7,46

La position du point M_2 sur le diagramme ternaire est déterminée par les coordonnées :

$$C_1 = 74,67$$
$$C_M = 14,45$$
$$C_5^+ = 10,88$$

- Composition de l'huile à l'équilibre H_2

Pour obtenir la composition de l'huile H_2 en équilibre avec le gaz G_2 il faut du mélange M_2 déduire la masse des constituants composant G_2. Pour cela on va, comme pour le gaz G_1, calculer la masse du gaz G_2 ainsi que celle de chacun de ses constituants. Les caractéristiques de G_2 calculées comme pour G_1 sont :

masse moléculaire M = 19,81

facteur de compressibilité Z = 0,895

volume à 197,15 bars et 100° C V = 254,90

nous permettent de calculer sa masse :

$$m = \frac{MPV}{ZRT} = \frac{19,81 \times 197,15 \times 254,90}{0,895 \times 83,1417 \times 373,16} = 35,8642 \text{ g}$$

On calcule le pourcentage en masse du gaz G_2, la masse de chaque constituant et en le retirant du mélange M_2 on arrive à la composition de l'huile H_2.

- TABLEAU 5 -

	G_2 % masse	G_2 masse en grammes	M_2 masse en grammes	H_2 masse (M_2 - G_2)	H_2 % masse	H_2 % volume
C_1	69,10	24,7822	24,2563	4,4741	6,82	40,91
N_2	0,48	0,1721	0,7664	0,5943	0,91	3,13
CO_2	/	/	0,0364	0,0364	0,06	0,13
C_2	9,91	3,5541	5,0434	1,4893	2,27	7,20
C_3	7,30	2,6181	5,3412	2,7231	4,15	8,84
iC_4	1,40	0,5021	0,8880	0,3859	0,59	0,95
nC_4	5,33	1,9116	3,4137	1,5021	2,29	3,64
iC_5	1,32	0,4734	1,1719	0,6985	1,06	1,35
nC_5	2,23	0,7998	2,4020	1,6022	2,44	3,11
C_6	2,93	1,0508	3,2755	2,2247	3,39	3,62
C_7^+	/		49,8595	49,8595	76,02	27,12

La position de H_2 sur le diagramme ternaire est déterminé par les coordonnées ;

C_1	44,04
C_M	20,76
C_5^+	35,20

- Tracé du diagramme -

Nous avons utilisé comme diagramme le triangle rectangle isocèle (figure 50) qui nous permet d'étudier la pente des droites de raccordement telles que G_2 H_2, car nous sommes dans un système à coordonnées rectangulaires. Le pourcentage des hydrocarbures intermédiaires C_M est porté en abscisse, celui des légers C_1 en ordonnée. La pente de G_2 H_2 est :

$$\frac{(C_1)_{H_2} - (C_1)_{G_2}}{(C_M)_{H_2} - (C_M)_{G_2}} = \frac{44,04 - 86,42}{20,76 - 11,99} = - 4,83$$

Cette première étape nous a donné un gaz G_2 enrichi en hydrocarbures intermédiaires par rapport au gaz injecté G_1. Ce gaz enrichi G_2 va être injecté dans de l'huile vierge de réservoir comme cela se produirait dans le cas d'une injection dans un gisement où, comme nous l'avons vu, le gaz s'enrichit aux dépens de l'huile non déplacée et continu à avancer en rencontrant toujours de l'huile vierge. C'est cet avancement que nous avons essayé de recréer au moyen de plusieurs équilibres, et nous avons suivi l'évolution de l'enrichissement successif du gaz injecté G_1 qui devient successivement : G_2, G_3, G_4, G_5, G_6 ...

b) Deuxième étape

Le gaz injecté G_2 dans l'huile de réservoir H_1, donne à l'équilibre un gaz enrichi G_3 en équilibre avec une huile H_3.

Volume d'huile H_1 au départ	: 90,95 cm^3
Volume de gaz G_2 injecté	: 235,24 cm^3
Volume de G_3 récupéré	: 209,00 cm^3 (masse moléculaire 22,37)
	Z = 0,825
Volume d'huile H_3 recueilli	: 94,21 cm^3

Les compositions volumétriques de H_3 et G_3 en équilibre, ainsi que celle du point M_3 (mélange G_2 + H_1) sont données dans le tableau 6.

- TABLEAU 6 -

Constituants	M_3	H_3	G_3
C_1	68,53	45,07	78,18
N_2	0,81	/	1,15
CO_2	0,03	0,10	/
C_2	9,25	9,96	8,92
C_3	6,45	9,43	5,18
iC_4	0,88	1,16	0,75
nC_4	3,31	4,81	2,67
iC_5	0,81	1,41	0,56
nC_5	1,57	2,95	0,99
C_6	1,77	3,29	1,13
C_7^+	6,59	21,82	0,47

La position de ces 3 points est déterminée sur le diagramme par les coordonnées :

G_3	C_1	79,33	M_3	C_1	69,34	H_3	C_1	45,17
	C_M	17,52		C_M	19,92		C_M	25,36
	C_5^+	3,15		C_5^+	10,74		C_5^+	29,47

la pente de la droite de raccordement G_3 H_3 est :

$$\frac{45,17 - 79,33}{25,36 - 17,52} = - 4,36$$

c) Troisième étape

Injection de gaz G_3 dans de l'huile vierge, qui nous donnera à l'équilibre G_4 et H_4.

L'injection de G_3 : 161,89 cm^3.

dans 68,89 cm^3 de H_1 donne :

Volume de G_4 : 132,00 cm^3 (Z = 0,809 ; MM = 23,45)
Volume de H_4 : 84,64 cm^3.

Les compositions volumétriques de G_4, M_4, H_4 sont données dans le tableau 7 :

- TABLEAU 7 -

Constituants	M_4	G_4	H_4
C_1	62,64	73,08	45,88
N_2	1,41	2,29	0,04
CO_2	0,03	0,32	/
C_2	11,06	10,98	11,06
C_3	7,94	6,20	10,52
iC_4	1,09	0,90	1,37
nC_4	4,00	3,00	5,51
iC_5	0,97	0,62	1,50
nC_5	1,88	1,03	3,17
C_6	2,15	0,86	4,10
C_7^+	6,83	0,72	16,85

La position de ces 3 points est déterminée sur le diagramme par les coordonnées :

M_4 : C_1 = 64,05 ; C_m = 24,12 ; C_5^+ = 11,83

G_4 : C_1 = 75,37 ; C_m = 21,38 ; C_5^+ = 3,25

H_4 : C_1 = 45,92 ; C_m = 28,46 ; C_5^+ = 25,62

La pente de la droite de raccordement G_4 H_4 est :

$$\frac{45,92 - 75,37}{28,46 - 21,38} = - 4,16$$

d) Quatrième étape

Où le gaz G_4 est injecté dans l'huile H_1 dans les proportions suivantes :

H_1 départ 47,67 cm^3
G_4 injecté 117,44 cm^3
G_5 récupéré 91,52 cm^3 Masse moléculaire 23,96 Z = 0,800
H_5 recueilli 61,33 cm^3.

- TABLEAU 8

Constituants	M_5	G_5	H_5
C_1	59,65	71,23	42,76
N_2	2,25	1,10	3,86
CO_2	0,27	0,44	0,03
C_2	12,51	13,01	11,70
C_3	8,58	7,18	10,49
iC_4	1,19	0,74	1,81
nC_4	4,19	2,83	6,08
iC_5	1,00	0,64	1,50
nC_5	1,87	0,98	3,12
C_6	1,90	0,90	3,29
C_7^+	6,59	0,95	15,36

La position de ces 3 points est déterminée sur le diagramme par les coordonnées :

M_5	C_1	61,90	G_5	C_1	72,33	H_5	C_1	46,62
	C_m	26,74		C_m	24,20		C_M	30,11
	C_5^+	11,36		C_5^+	3,47		C_5^+	23,27

La pente de la droite de raccordement G_5 H_5 est :

$$\frac{61,90 - 72,33}{26,74 - 24,20} = - 4,11$$

e) Cinquième étape

De cette étape on n'a pu obtenir que l'analyse du gaz enrichi G6, des fuites nous ayant faussé les mesures volumétriques.

Analyse de G_6 :

C_1	67,93
N_2	2,49
CO_2	0,69
C_2	13,40
C_3	7,08
iC_4	3,28
nC_4	3,28
iC_5	0,69
nC_5	1,25
C_6	1,10
C_7^+	1,11

Point représentatif :

G_6	C_1	70,42
	C_m	25,43
	C_5^+	4,15

Les expériences de gaz vaporisant de l'huile de gisement ont été arrêtées ici, car on approche de la limite G1 d'enrichissement du gaz (figures 35 et 36). Le point G1 est le point représentatif du gaz en équilibre avec une huile H1, tel que la droite de raccordement G1 H1 passe par le point représentatif de l'huile de gisement H_1. Ce gaz G1 injecté dans l'huile de gisement, amène celle-ci à saturation au point H1. A ce moment là aucune transformation n'affecte plus ni le gaz ni l'huile. C'est la limite du gaz qui se trouve en avant du front d'avancement dans les cas d'injections soit de gaz riche, soit de gaz pauvre comme c'est le cas ici.

Pour déterminer ce point limite nous allons étudier les variations des C_1 et des C_m au long des 5 étapes et les représenter en fonction du pourcentage des C_1 et celui des C_m (figures 37 et 38).

Lorsque la courbe rencontrera l'axe de C_1 ou de C_m (variation nulle) on aura le pourcentage en C_1 ou C_M du point G1.

Voici le tableau 9 représentant ces variations :

- TABLEAU 9

Etape	ΔC_1	ΔC_m	C_1 moyen	C_M moyen
1	- 10,96	+ 9,37	91,90	7,30
2	- 7,09	+ 5,53	82,87	14,75
3	- 3,96	+ 3,86	77,35	19,45
4	- 3,04	+ 2,82	73,85	22,79
5	- 1,91	+ 1,23	71,37	24,81

Les coordonnées du point G1 déterminées graphiquement sur ces figures (37 et 38) sont :

C_1	67,8
C_m	28,5
C_5^+	3,7

La pente de la droite de raccordement limite G_1 H_1 qui passe par H_1 est :

$$\frac{21,9 - 67,8}{41,9 - 28,5} = - 3,45$$

2 - Zone de "Gaz se condensant dans l'huile"

Le gaz utilisé au cours de cette expérience est un gaz reconstitué par mélanges de quantités connues d'hydrocarbures purs afin de se rapprocher le plus possible de la composition du gaz de séparateur qui serait disponible pour être injecté dans le gisement. Les compositions de ce gaz de séparateur et du gaz reconstitué sont les suivantes :

Constituants	Gaz de séparateur % volume	Gaz injecté % volume
C_1	58,0	56,53
N_2	5,0	4,99
CO_2	2,0	2,36
C_2	20,0	20,19
C_3	11,0	11,64
iC_4	1,3	1,53
nC_4	1,7	2,08
iC_5	0,4	0,38
nC_5	0,6	0,30

Les points représentatifs de ces deux gaz sur le diagramme ternaire ont pour coordonnées :

C_1	63,0	61,52
C_m	36,0	37,80
C_5^+	1,0	0,68

On s'aperçoit que le gaz reconstitué est légèrement plus riche en hydrocarbures intermédiaires que le gaz de séparateur, et que tous deux se trouvent dans la zone située à droite de la limite d'enrichissement du gaz se condensant dans l'huile. Le gaz va donc s'appauvrir en hydrocarbures intermédiaires au fur et à mesure de son avancement, tandis que l'huile s'enrichira en ces mêmes hydrocarbures de l'avant vers l'arrière de la zone d'échange. Nous avons essayé de retracer expérimentalement, en réalisant plusieurs équilibres, l'évolution des échanges qui s'effectuent entre l'huile et le gaz à différents niveaux et à différentes époques de ce déplacement. L'ensemble des équilibres réalisés est montré figure 39.

Les expériences sont effectuées de la même manière et avec le même appareillage que pour la détermination de la zone du "gaz vaporisant de l'huile". Cependant tout au long de cette expérience des fuites de gaz sont venues perturber les mesures volumétriques effectuées sur le gaz en cours d'expérience, mais n'affectant pas les mesures sur les

- TABLEAU 10 - COMPOSITION DES GAZ DE LA ZONE "GAZ SE CONDENSANT DANS L'HUILE" -

Constituants	Gaz de Séparateur	G	G_1	$G_{1,2}$	$G_{2,2}$	$G_{1,3}$	$G_{2,3}$	$G_{3,3}$	$G_{1,4}$	$G_{2,4}$	$G_{3,4}$	$G_{4,4}$
C_1	58,0	56,53	54,85	54,71	59,08	56,00	56,08	56,09	57,98	61,44	57,54	56,10
N_2	5,0	4,99	7,39	6,24	9,88	5,42	7,23	11,48	2,73	1,31	8,08	10,80
CO_2	2,0	2,36	1,77	1,98	0,88	2,08	1,70	0,48	2,36	2,24	1,36	0,80
C_2	20,0	20,19	18,26	18,36	14,67	19,74	17,73	15,97	19,51	19,05	16,72	16,14
C_3	11,0	11,64	9,75	9,14	7,60	10,46	9,05	9,02	11,70	8,90	8,26	8,41
iC_4	1,3	1,53	1,21	1,16	0,70	0,70	0,85	0,77	1,18	0,91	0,85	0,92
nC_4	1,7	2,08	3,09	2,39	2,18	2,59	2,69	3,06	1,87	2,36	2,80	2,94
iC_5	0,4	0,38	0,72	0,53	0,52	0,58	0,78	0,65	0,44	0,63	0,78	0,78
nC_5	0,6	0,30	1,17	0,82	0,92	0,79	1,11	1,10	0,60	1,05	1,35	1,29
C_6			1,14	0,70	1,69	0,85	1,08	0,79	0,56	1,04	1,07	1,13
C_7^+			0,65	3,97	1,88	0,79	1,70	0,59	1,07	1,06	1,19	0,69

COORDONNEES DANS LE DIAGRAMME TERNAIRE

C_1	63,0	61,52	62,24	60,95	68,96	61,42	63,31	67,57	60,71	62,75	65,62	66,90
C_m	36,0	37,80	34,08	33,03	26,03	35,57	32,02	29,30	36,62	33,47	29,99	29,21
C_5^+	1,0	0,68	3,68	6,02	5,01	3,01	4,67	3,13	2,67	3,78	4,39	3,89

huiles. De sorte qu'après avoir effectué le bilan de l'opération pour déterminer la composition des huiles, leurs points figuratifs se trouvaient irrégulièrement distribués et en dessous de la courbe de saturation. Ainsi dans cette zone nous n'avons pu obtenir de points figuratifs d'huiles, mais on peut suivre l'évolution des huiles grâce à la composition des gaz qui leur sont en équilibre (tableau 10). De plus au cours de la détermination du point critique une vérification a été faite dans une huile préalablement enrichie en C_m et dans laquelle on a injecté un mélange de méthane et d'azote obtenant ainsi un mélange Ma, qui se trouve dans la zone diphasique et donnant un équilibre Ga ⟷ Ha dont les compositions se trouvent bien en accord avec celle de la zone déjà déterminée. La composition de l'huile de départ, du gaz injecté, de Ga et Ha sont montrées dans le tableau 11.

- TABLEAU 11

Composants	Huile départ % volume	Gaz injecté % volume	Ma % volume	Ha % volume	Ga % volume
C_1	13,06	92,06	49,16	44,60	59,34
N_2	1,39	7,94	1,01	3,04	7,60
CO_2	1,86	/	4,38	1,00	1,02
C_2	30,20	/	16,48	16,99	14,86
C_3	19,63	/	10,49	10,70	10,50
iC_4	2,57	/	1,40	1,54	1,02
nC_4	6,59		3,60	3,98	2,58
iC_5	1,75		0,95	1,15	0,45
nC_5	3,33		1,82	2,24	0,75
C_6	3,22		1,76	2,09	0,91
C_7^+	16,40		8,95	12,67	0,97

Les points représentatifs de ces mélanges sont :

C_1	14,45	100,00	53,54	47,64	66,94
C_m	60,85	/	32,98	34,21	29,98
C_5^+	24,70	/	13,48	18,15	3,08

Du point de vue du tracé du diagramme, étant donné les positions relatives du gaz injecté et de l'huile de gisement, on peut tirer les conclusions suivantes :

- pour l'huile qui s'enrichit on ne peut que passer des positions huile saturée Hs à l'huile d'enrichissement maximum Hm en équilibre avec Gm, la droite Gm Hm passant par le point figuratif du gaz injecté (figure 40).

- pour le gaz qui s'appauvrit on va de la composition du gaz injecté qui se trouve en arrière de la zone de mélange au gaz le plus pauvre (après de nombreux contacts avec l'huile de gisement) qui est G1. Cette variation du gaz se traduit sur le diagramme de la progression des points : G1, G44, G34, G24, G14, Gm ou à une époque antérieure par les points G33, G23, G13. La composition de la totalité des gaz analysés au cours des différents équilibres est montrée dans le tableau 10. L'évolution de la composition du gaz peut être suivie de deux manières :

    - tout au long de la zone de mélange à un instant donné. Nous avons tracé les courbes (fig. 41, 42 et 43) au cours des 3 et 4ème étapes, en considérant que les gaz sont répartis régulièrement tout au long de la zone de mélange.

    - aux extrémités de la zone de mélange en fonction du temps. Figure 44 à l'arrière du bouchon, Figure 45 à l'avant. La formation et l'évolution de la zone de mélange vont être suivies aussi au point de vue des volumes de différentes manières :

        . huile en avant : à mesure que le gaz avançant dans l'huile de gisement s'appauvrit en hydrocarbures intermédiaires, l'huile saturée par ce gaz va gonfler d'autant plus que le gaz en avant sera plus pauvre. Sur la figure 46 on suit l'augmentation de volume des huiles H22, H33 et H44 provenant du contact de l'huile vierge avec les gaz de plus en plus pauvre G1, G22, G33.

        . huile en arrière : l'enrichissement de l'huile en hydrocarbures intermédiaires s'effectue avec une diminution de volume, qui fait suite à l'augmentation de volume due

à la saturation au début de la formation de la zone de mélange lorsque le gaz et l'huile entrent en contact. Cette diminution peut être suivie sur la courbe (fig. 47) représentant l'évolution de l'huile enrichie successivement par le gaz injecté de la composition de départ H à l'huile la plus enrichie H 14, en passant par H11, H 12, H13.

- Huile le long de la zone de mélange : la fig. 48 représente au cours de la 4ème étape les variations de volume subies par l'huile de départ H. Le gonflement de l'huile se trouvant à l'avant va favoriser l'expulsion de l'huile, cet effet venant s'ajouter à celui de la poussée du gaz.
- Diminution du gaz en avant : figure 49.
  Le gaz appauvri se trouvant en avant de la zone de mélange doit disparaître par saturation de l'huile de gisement. Malgré les fuites (environ 10 %) qui sont venues perturber les mesures sur les volumes gazeux, on peut se faire une idée de la disparition du gaz appauvri; en effet l'erreur intervenant toujours dans le même sens, l'allure de la courbe n'en est pas changée.

Cette étude nous a permis de tracer le diagramme dans cette zone proche du point critique, et de vérifier la formation de cette zone de mélange tout en nous donnant des renseignements utiles sur des données intéressant la dynamique du déplacement : gonflement de l'huile et disparition du gaz appauvri en avant de la dite zone.

3 - Détermination du point critique -

Afin de déterminer la position du point critique sur le diagramme ternaire nous avons utilisé 2 mélanges de base essentiellement composé, l'un de C_1, l'autre de C_m de façon qu'en les combinant, on puisse se déplacer très près de la droite C_1 Cm ; on obtient ainsi les points tels que A, B, C et D. Et en ajoutant ces combinaisons à une certaine quantité d'huile de réservoir H, on décrit les droites HA, HB, HC, HD, qui nous permettent de savoir si l'on coupe ou non la courbe limite des phases.

Les mélanges de base de C_1 et C_m étaient constitués de manière à ce que les constituants s'y trouvent dans les mêmes proportions que dans le gaz de séparateur.

La composition des deux produits de base est :

Constituants	Mélange C_1 % volume	Mélange C_m % volume
C_1	92.06	
N_2	7.94	
CO_2		5.24
C_2		56.10
C_3		27.81
iC_4		3.65
nC_4		4.65
iC_5		1.08
nC_5		1.47

Pour obtenir la composition des mélanges résultants, au lieu d'utiliser l'équation d'état des gaz réels en déterminant le facteur de compressibilité qui est très variable pour un gaz composé uniquement d'hydrocarbures intermédiaires, nous avons préféré utiliser les masses volumiques des mélanges C_1 et C_m qui sont :

C_1 $m_v = 0,112$ g/cm^3

C_m $m_v = 0,400$ g/cm^3

et connaissant les volumes et la composition en masse des C_1 et C_m,

la composition des mélanges est déterminée de la même manière que dans les cas précédents. Nous avons préparé successivement les 4 mélanges A, B, C et D.

	A	B	C	D
Volume de C_1 (100°C, 197,15 bars	18,5	20,03	18,52	18,36
Volume de C_m (100°C,197,15 bars	10,00	10,00	8,66	8,20

La composition de ces 4 mélanges est (en % volume) :

Constituants	A	B	C	D
C_1	49.98	51.78	53.26	54.29
N_2	4.31	4.48	4.59	4.68
CO_2	2.40	2.29	2.21	2.15
C_2	25.65	24.54	23.65	23.02
C_3	12.71	12.17	11.72	11.41
iC_4	1.67	1.60	1.54	1.50
nC_4	2.12	2.03	1.96	1.91
iC_5	0.49	0.47	0.45	0.44
nC_5	0.67	0.64	0.62	0.60

Les ccordonnées de ces points dans le diagramme ternaire sont :

Constituants	A	B	C	D
C_1	54.29	56.26	57.85	58.97
C_m	44.55	42.63	41.08	39.99
C_5^+	1.16	1.11	1.07	1.04

Ces 4 complexes d'hydrocarbures ont été injectés dans de l'huile de gisement aux conditions de fond. On a obtenu les résultats suivants :

- l'injection de A et B dans de l'huile H nous a permis de parcourir les droites HA et HB. Et dans ces deux cas, on est passé du point H aux points A et B d'une manière continue, c'est-à-dire sans couper la courbe limite.

- en décrivant la droite HC, on est passé par le point critique. En effet tout le long de la droite on était en monophasique sauf à ce point où l'on a obtenu une très légère condensation. Ce point a été obtenu par mélange de 5,57 cm3 d'huile de réservoir, avec 27,18 cm3 de C_1 (à 100° et 197,5 bars) ce qui donne comme composition pour de point critique :

Constituants	% Volume
C_1	48.34
N_2	4.23
CO_2	1.90
C_2	22.63
C_3	12.26
iC_4	1.61
nC_4	2.79
iC_5	0.69
nC_5	1.16
C_6	0.72
C_7^+	3.67

et comme coordonnées dans le diagramme :

C_1	52,57
C_m	41.19
C_5^+	6.24

Afin de déterminer complètement le diagramme ternaire (figures 50 et 51) il faut tracer la tangente à la courbe limite des phases au point critique, de façon à définir la zone des mélanges critiques. Connaissant le point de tangence, il suffit d'avoir la

pente pour déterminer complètement cette tangente. Nous savons que cette tangente est la limite des droites de raccordement, or celles-ci ont des pentes inférieures à -4 qui vont en croissant légèrement lorsqu'on s'avance vers le point critique (figure 51). On arrive pour Ce point à une pente d'environ -3,8 (fig. 52). Cette pente délimite au-dessus un déplacement miscible avec l'huile de réservoir. D'après le diagramme on voit par exemple qu'un gaz contenant 40 % de Cm et 2 % de C_5^+ doit être miscible à l'huile après plusieurs contacts.

RESUME ET CONCLUSION

L'étude qui nous a été proposée est "L'injection de gaz de séparateur dans les gisements d'huile du Sahara peut-elle conduire à un déplacement miscible ?". Avant toute autre chose nous avons étudié les injections de gaz qui, avec les injections d'eau, sont les deux moyens de compléter le jaillissement naturel de l'huile. C'est à l'aide du diagramme que nous pouvons différencier et étudier le mécanisme des différents types de déplacements par injection de gaz. Ce diagramme ternaire est construit en divisant les composants d'un mélange complexe d'hydrocarbures en trois groupes : légers, intermédiaires et lourds ; à l'intérieur, la courbe limite des phases le divise en quatre régions : gazeuse, diphasique, liquide et mélanges critiques. Ce diagramme, bien qu'il ne soit pas thermodynamiquement rigoureux (puisqu'il ne s'agit pas de composés chimiquement purs, mais de mélanges) nous permet de distinguer entre déplacements miscibles et non miscibles par étude de la formation de la zone de mélange. Le déplacement est miscible lorsque tout au long de cette zone de mélange il n'y a aucune discontinuité qui entraînerait l'apparition de forces capillaires et de là un mauvais balayage d'huile en place. On distingue trois sortes de déplacements miscibles ayant comme point commun : l'huile ou le gaz se trouve dans la zone de mélanges critiques, située à droite de la tangente à la courbe limite de phases au point critique ; ce sont :

- Injection miscible de gaz vaporisant l'huile
- Injection miscible de gaz se condensant dans l'huile
- Injection d'un bouchon de gaz liquéfiés.

Après la description des mécanismes nous avons, en reprenant les expériences de nombreux chercheurs, étudié les influences qui sans affecter le caractère miscible du déplacement favoriseront la formation

de la zone de mélange et amèneront à une meilleure récupération. Ce sont tout particulièrement les efforts bénéfiques de l'élévation de pression et de la richesse du gaz en hydrocarbures intermédiaires, et au point de vue dynamique du déplacement : 'implantation des sondes, les vitesses de déplacement, l'hétérogénéité du milieu, l'effet de la pesanteur.

En application à cette étude, et en vue de réaliser un appareillage permettant de visualiser le déplacement, dans des conditions expérimentales moins sévères que pour l'huile du Sahara, nous avons entrepris de déplacer du brut du gisement de Lacq par injection de butane liquide. Ce déplacement se situe parmi ceux qui sont miscibles, c'est le cas de l'injection d'un bouchon de gaz liquéfiés. Nous avons pu ainsi voir le déplacement, étudier son évolution dans le temps et le pourcentage de brut récupéré.

Pour atteindre le but proposé sur l'huile du Sahara il nous faut déterminer les positions de l'huile de gisement et du gaz de séparateur par rapport à la zone des mélanges critiques. Pour cela il nous fallait construire le diagramme ternaire dans les conditions du gisement (200 bars et 100°C). Nous avons donc réalisé un appareillage permettant :

- d'effectuer en température et pression différents mélanges huile-gaz
- de laisser s'établir les échanges
- de séparer ensuite les deux phases et par analyse chromatographique et calcul déterminer leur composition afin de situer leur emplacement sur le diagramme.

Après l'étude de nombreux échanges à différentes compositions, et la détermination expérimentale du point critique, nous avons pu construire le diagramme qui nous permet de discuter des possibilités offertes pour obtenir un déplacement miscible.

En effet, dans les conditions actuelles du gisement, le gaz à injecter n'est pas assez riche en hydrocarbures intermédiaires pour se situer dans la zone critique et donner un déplacement miscible. De sorte que deux solutions se présentent : soit enrichir le gaz, soit comprimer le gisement, ce qui, par diminution de la surface de la zone diphasique va aussi amener le point figuratif du gaz dans la zone critique. Le choix entre ces deux solutions ne dépend pas de données de laboratoire, mais de questions essentiellement d'ordre économique : d'une part la disponibilité en hydrocarbures intermédiaires et le coût d'un enrichissement du gaz à injecter, et, d'autre part la possibilité et le coût d'une recompression à très forte pression. De plus, si cette méthode qui a été menée parallèlement avec une étude d'injection d'eau n'est pas retenue par la Société, elle pourra ultérieurement être revue pour des gisements de caractéristiques voisines.

Les systèmes que nous avons étudiés sont beaucoup trop complexes pour qu'on puisse leur appliquer des raisonnements thermodynamiques rigoureux. Il est cependant remarquable que la représentation ternaire, que l'on réserve généralement à des systèmes formés par 3 corps purs, nous ait permis d'obtenir des résultats pratiques parfaitement valables. Notre travail nous a conduit à construire un appareillage permettant d'opérer dans de vastes domaines de température et de pression. L'expérience montre qu'il pourrait être utilisé pour l'étude de systèmes ternaires beaucoup plus simples et mieux définis que les nôtres.

COURBES ET FIGURES

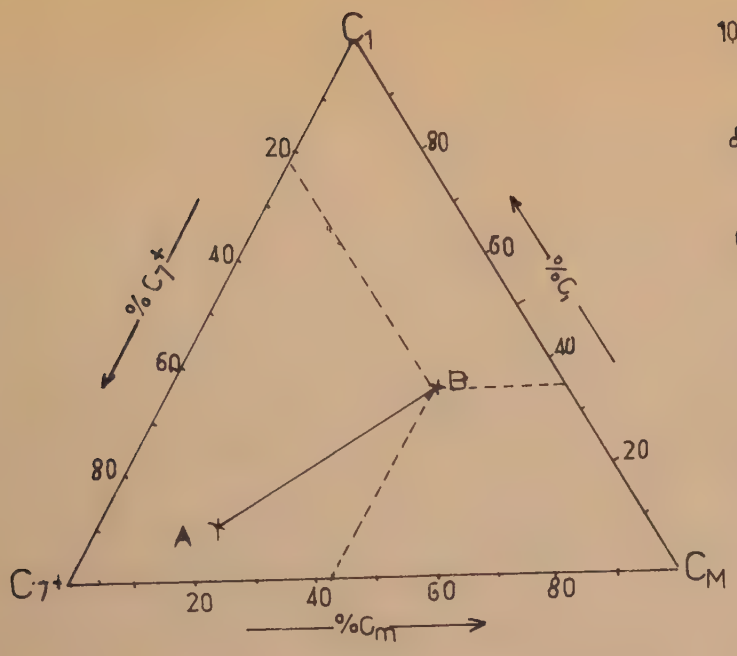


FIG.1a

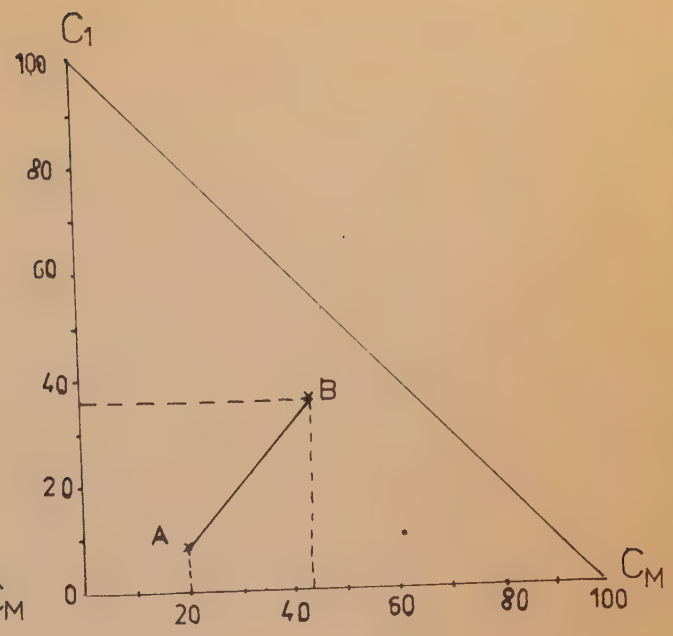


FIG.1b

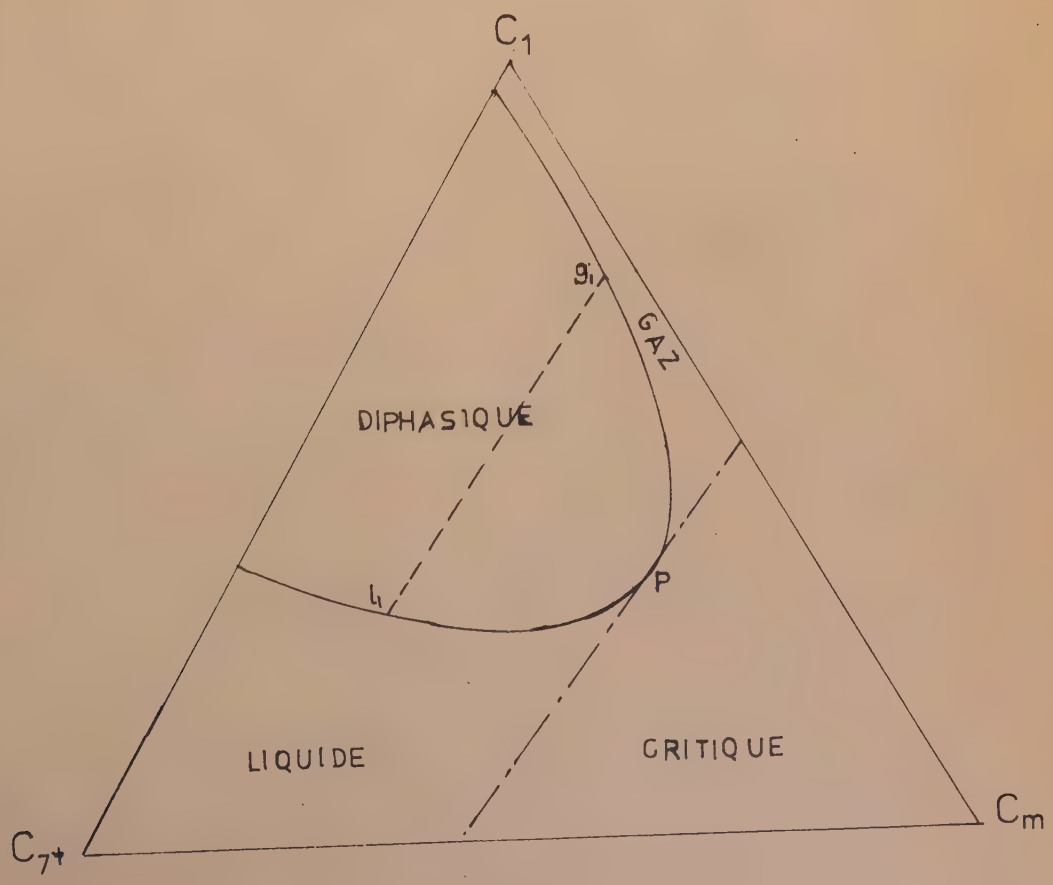


FIG. 2

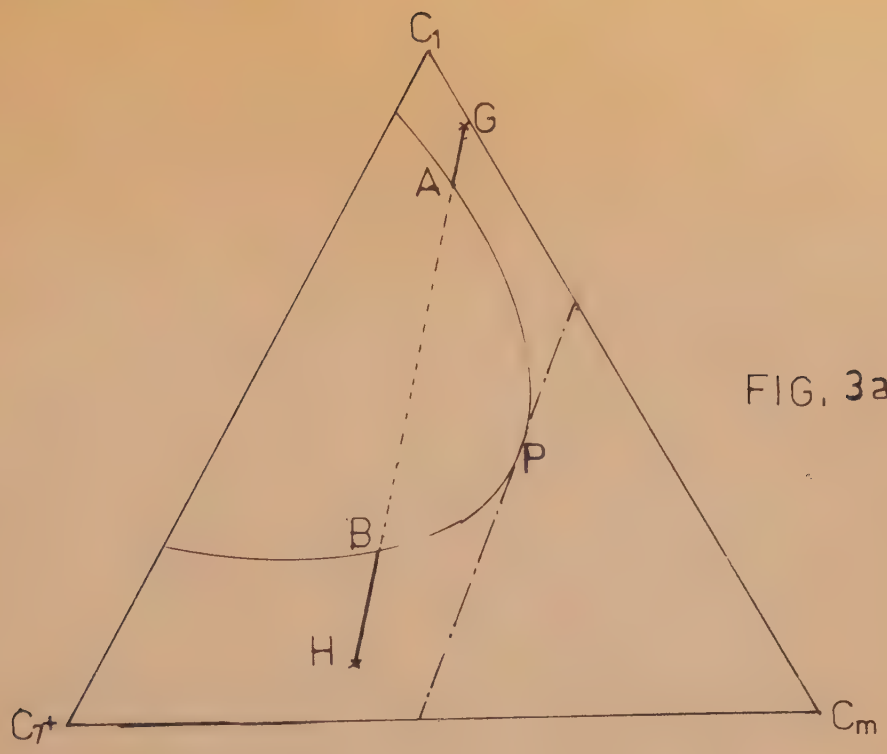


FIG. 3a

Deplacement en Equilibre

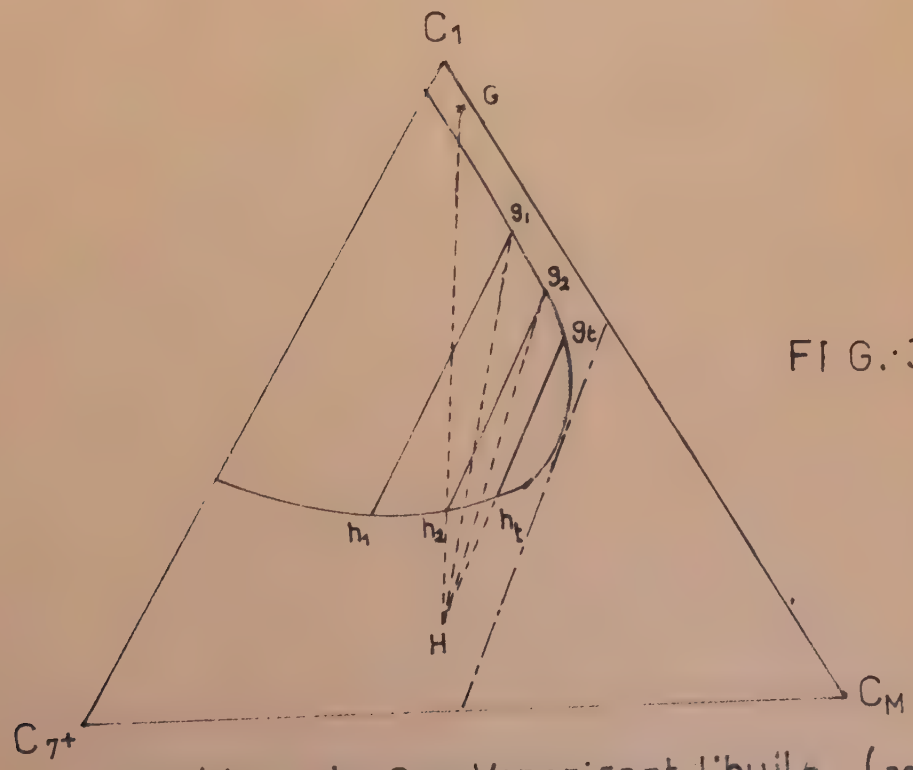


FIG. 3b

Injection de Gaz Vaporisant l'huile (non miscible)

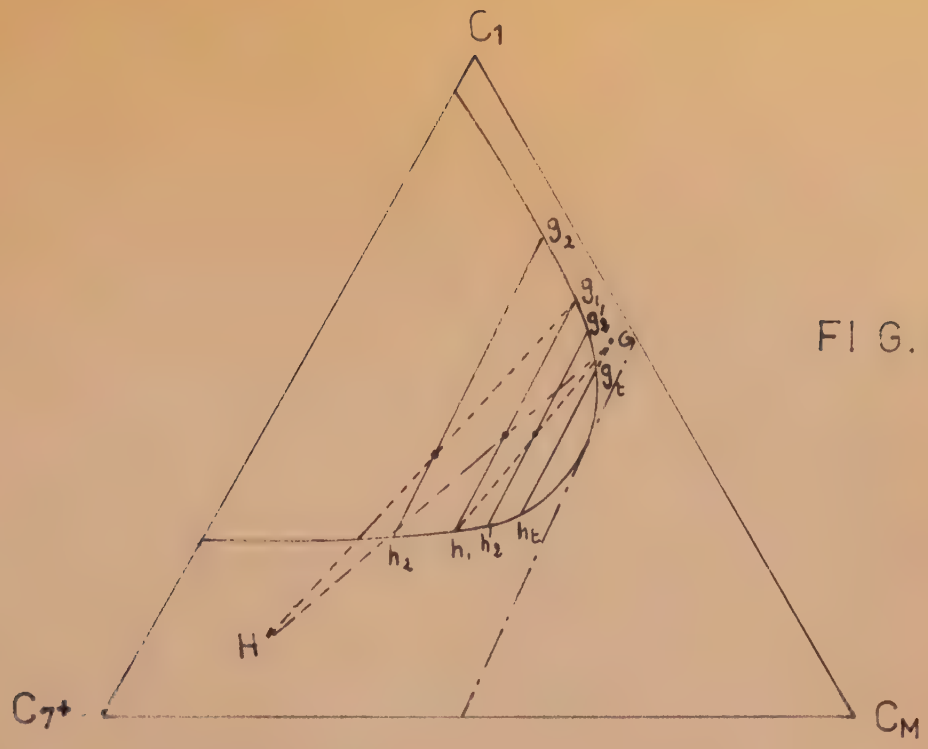


FIG. 3c

Injection de Gaz se condensant dans l'Huile (non miscible)

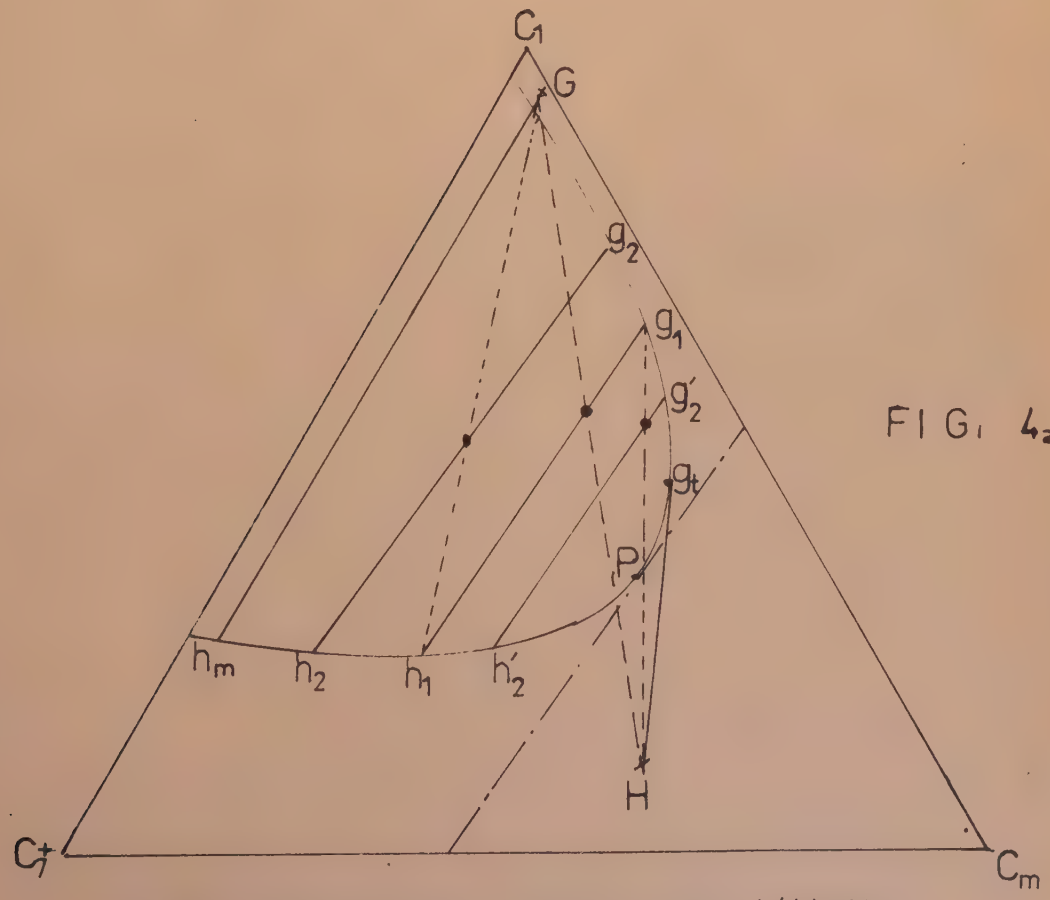


FIG. 4a

. Injection de Gaz Vaporisant l'Huile .

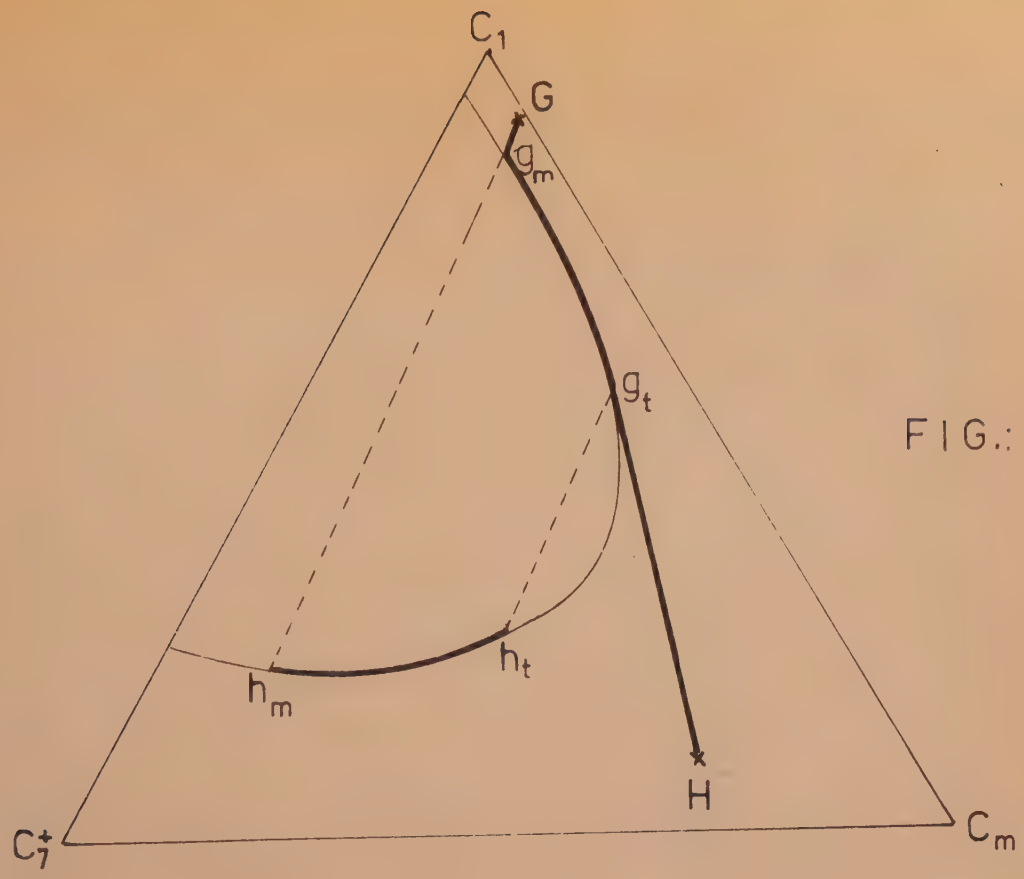

C1
G
gm
gt
ht
hm
H
C7+
Cm

FIG.: 4b

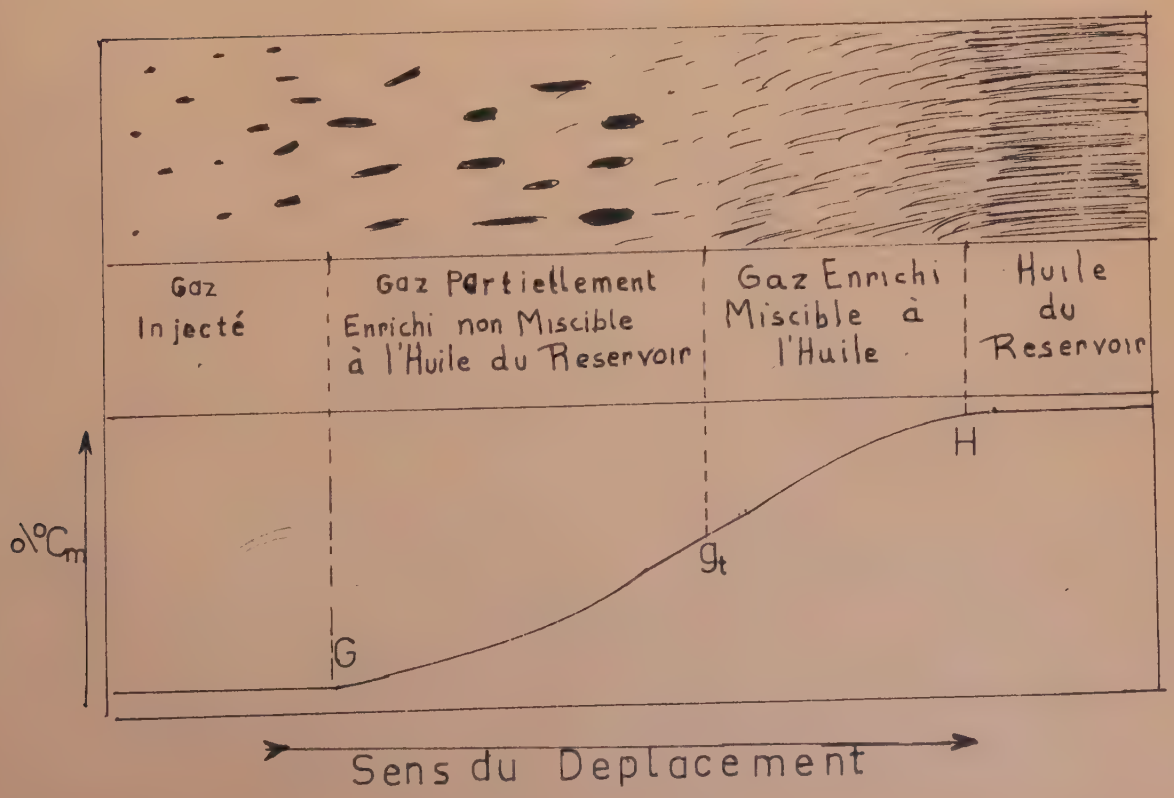

Gaz Injecté
Gaz Partiellement Enrichi non Miscible à l'Huile du Reservoir
Gaz Enrichi Miscible à l'Huile
Huile du Reservoir
H
gt
G
o/oCm
Sens du Deplacement

FIG. 4c

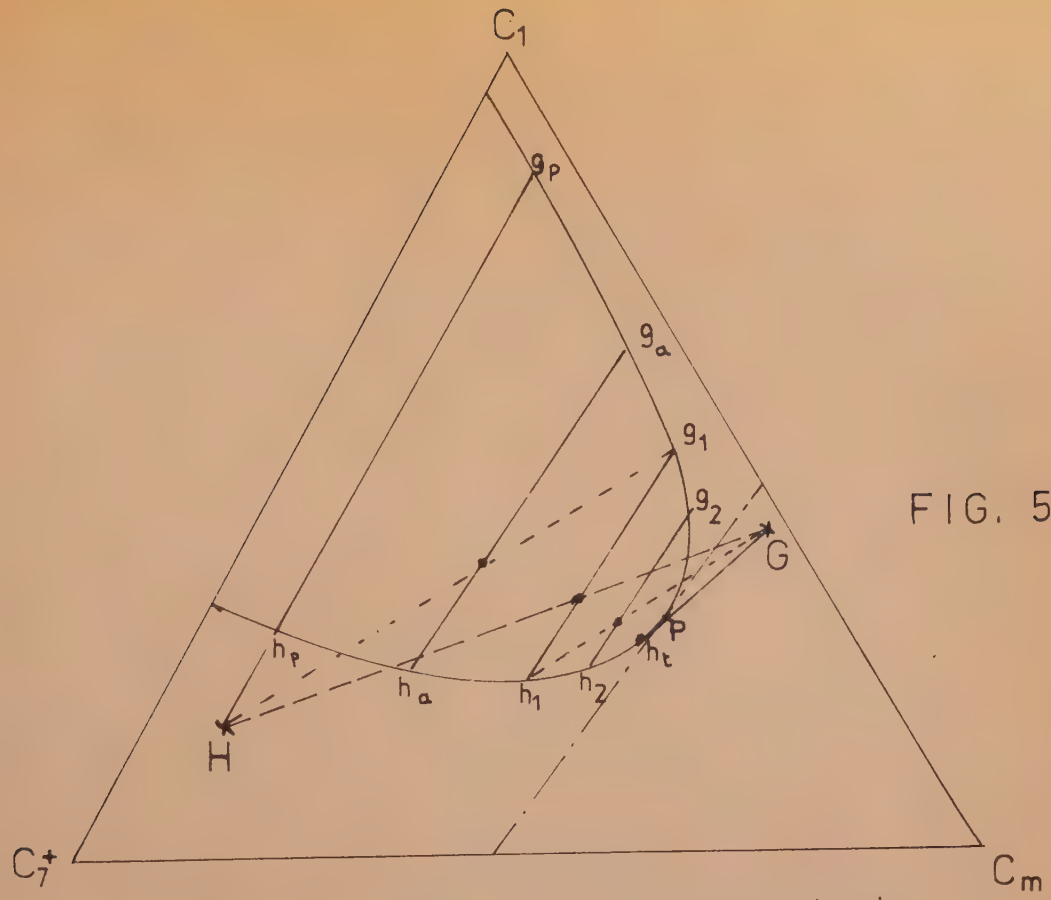


FIG. 5a

Injection de Gaz se condensant dans l'Huile

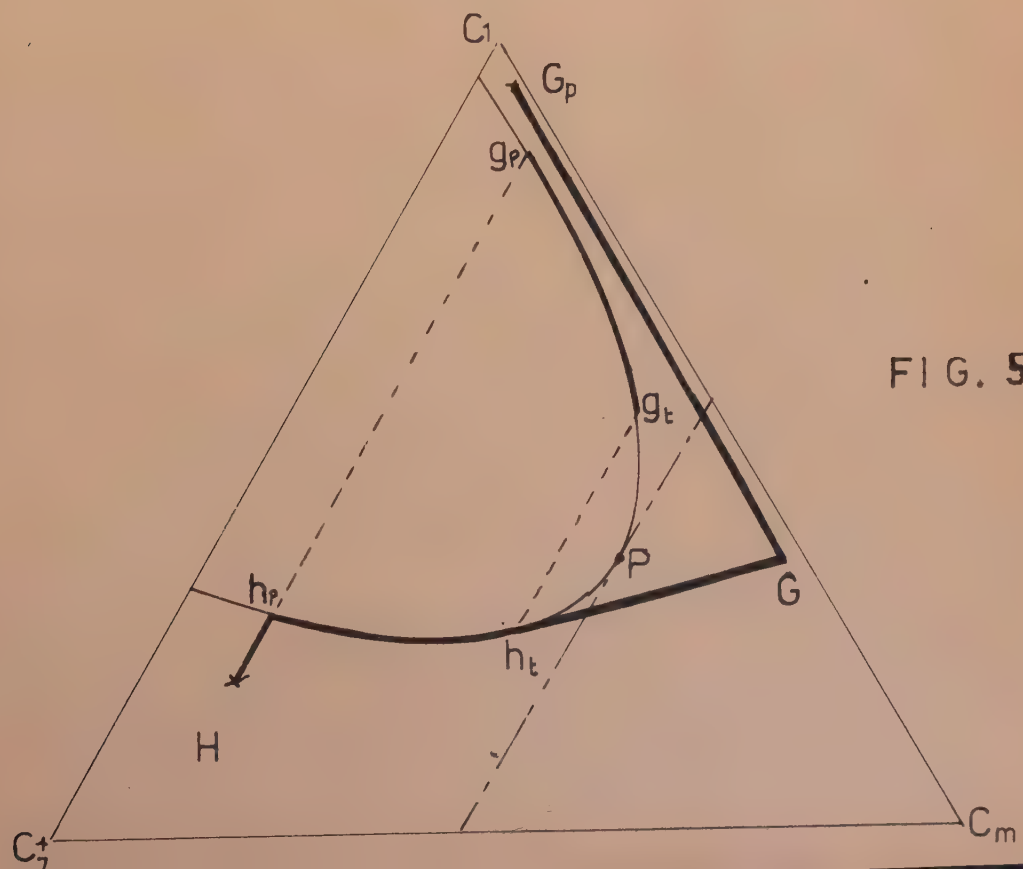


FIG. 5b

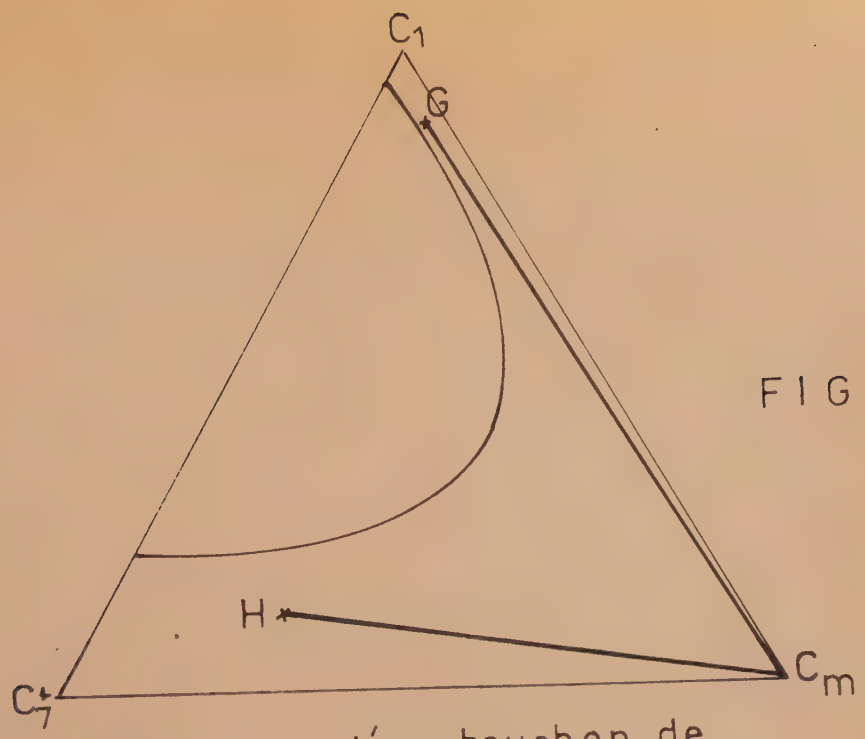


FIG. 6a

Injection d'un bouchon de gaz liquefiés

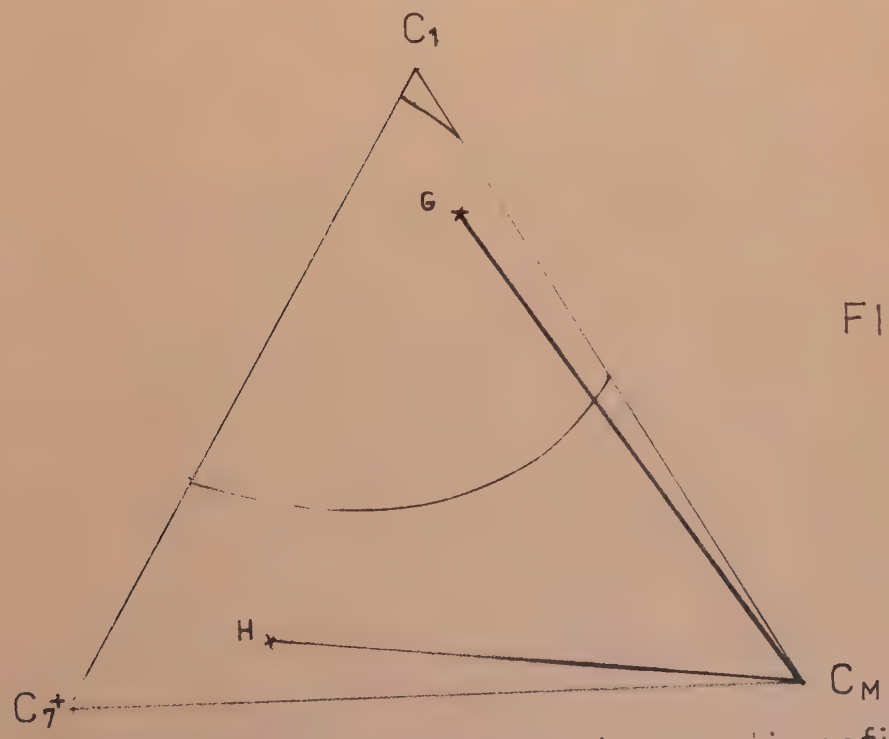


FIG. 6b

Injection d'un bouchon de gaz liquefiés (nonmiscible au gaz pousseur)

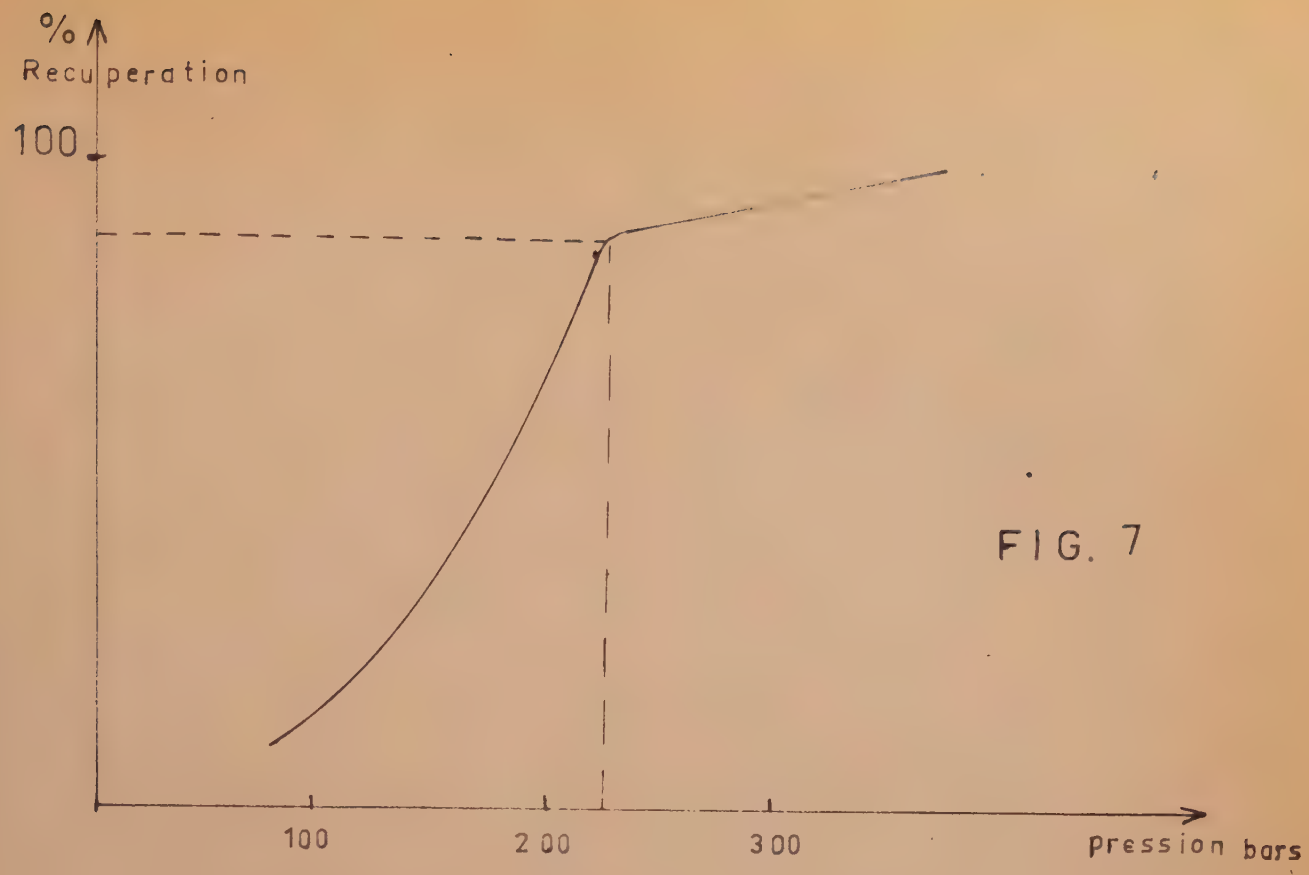

%
Recuperation
100
100
200
300
pression bars

FIG. 7

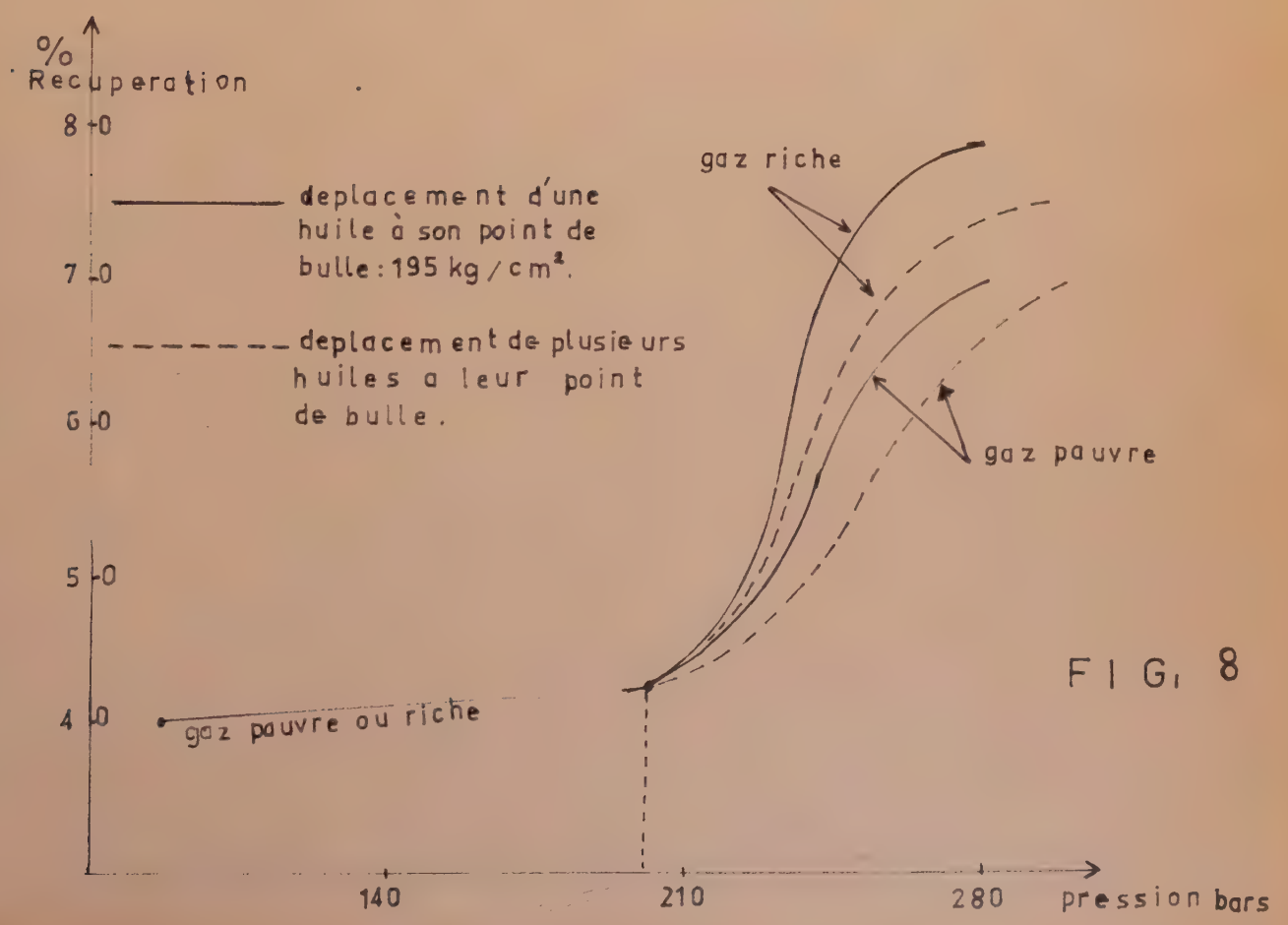

%
Recuperation
80
70
60
50
40
deplacement d'une huile à son point de bulle : 195 kg / cm².
deplacement de plusieurs huiles a leur point de bulle.
gaz riche
gaz pauvre
gaz pauvre ou riche
140
210
280
pression bars

FIG. 8

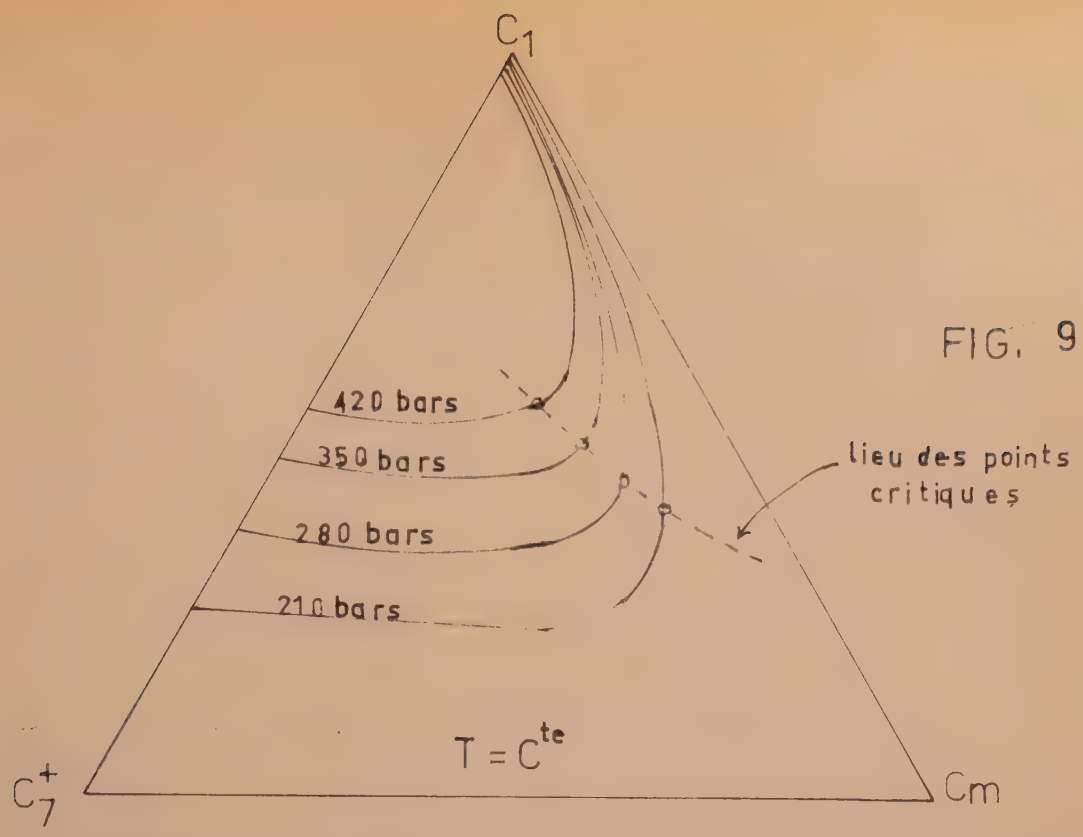


FIG. 9

VARIATION DES COURBES LIMITE DES PHASES AVEC LA PRESSION A TEMPERATURE CONSTANTE

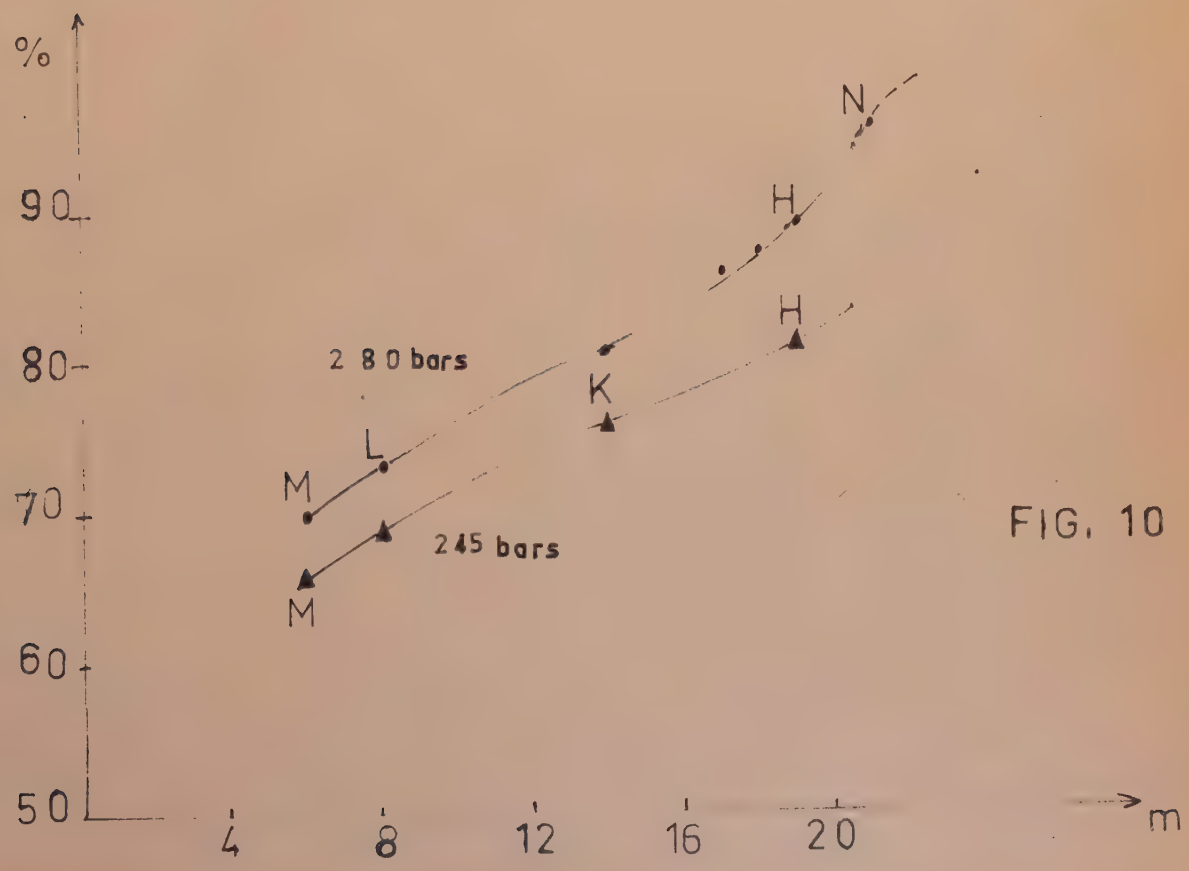


FIG. 10

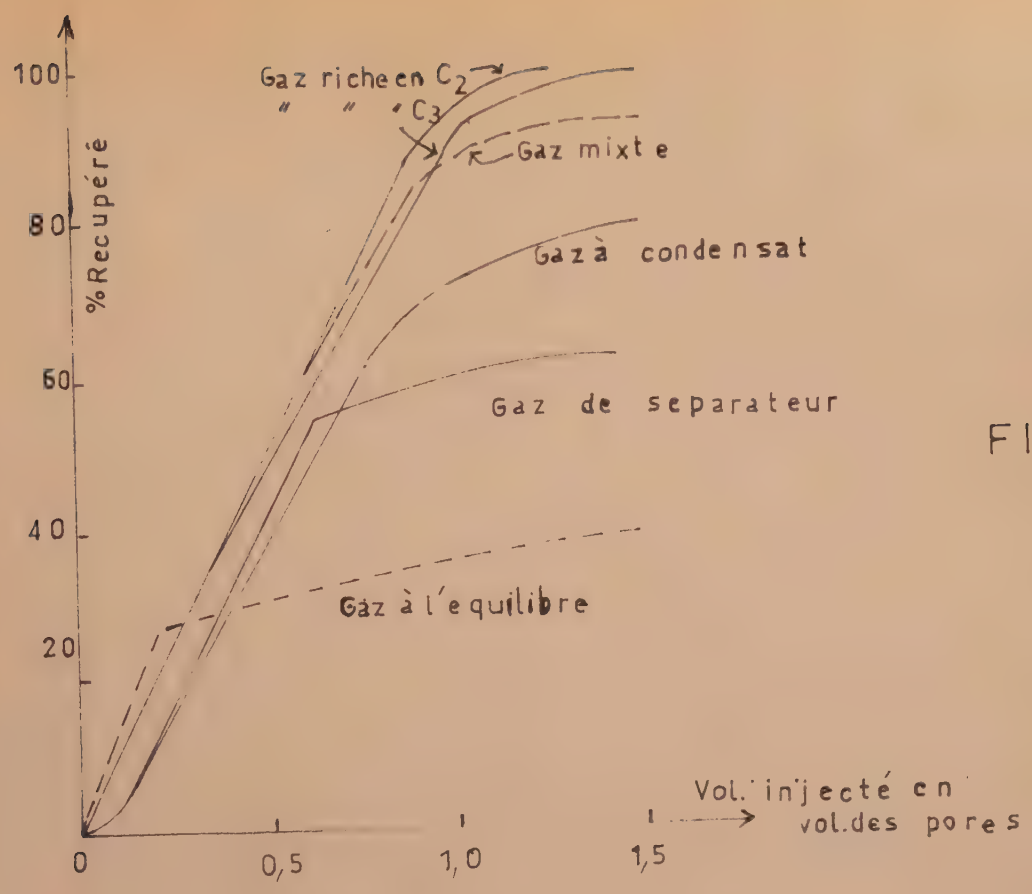


FIG. 11

Composants	Huile % Poids	Gaz de Separateur	Gaz à Condensat	Gaz Mixte	Gaz riche en C_3	Gaz riche en C_2
		% Volume				
methane	2,62	82,98	67,39	54,96	55,90	27,66
ethane	2,22	8,55	9,37	12,00	6,22	69,52
propane	5,93	6,04	10,96	14,40	36,23	2,01
i. butane	1,62	0,54	1,56	2,41	0,37	0,18
n. "	5,55	1,45	5,22	7,79	0,98	0,48
i. pentane	2,04	0,17	1,12	1,56	0,12	0,06
n. "	3,18	0,21	1,63	3,44	0,14	0,07
hexane	5,78	0,06	2,75	3,44	0,04	0,02
heptane	7,00					
octane	6,05					
nonane	5,56					
lourds	52,45					

TABLEAU 1

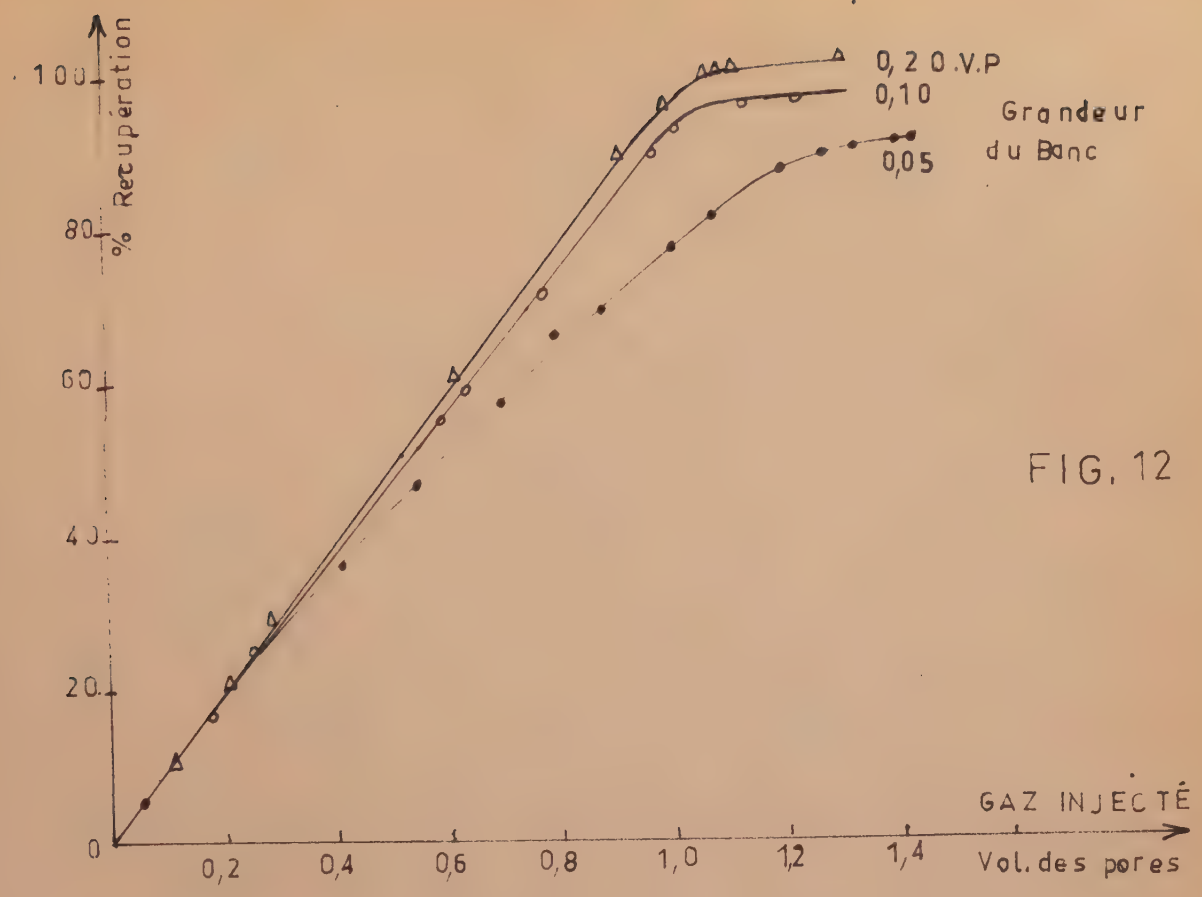

% Récupération
100
80
60
40
20
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
GAZ INJECTÉ
Vol. des pores
0,20.V.P
0,10
0,05
Grandeur
du Banc

FIG. 12

△ puits d'injection

O " de production

zone non balayée

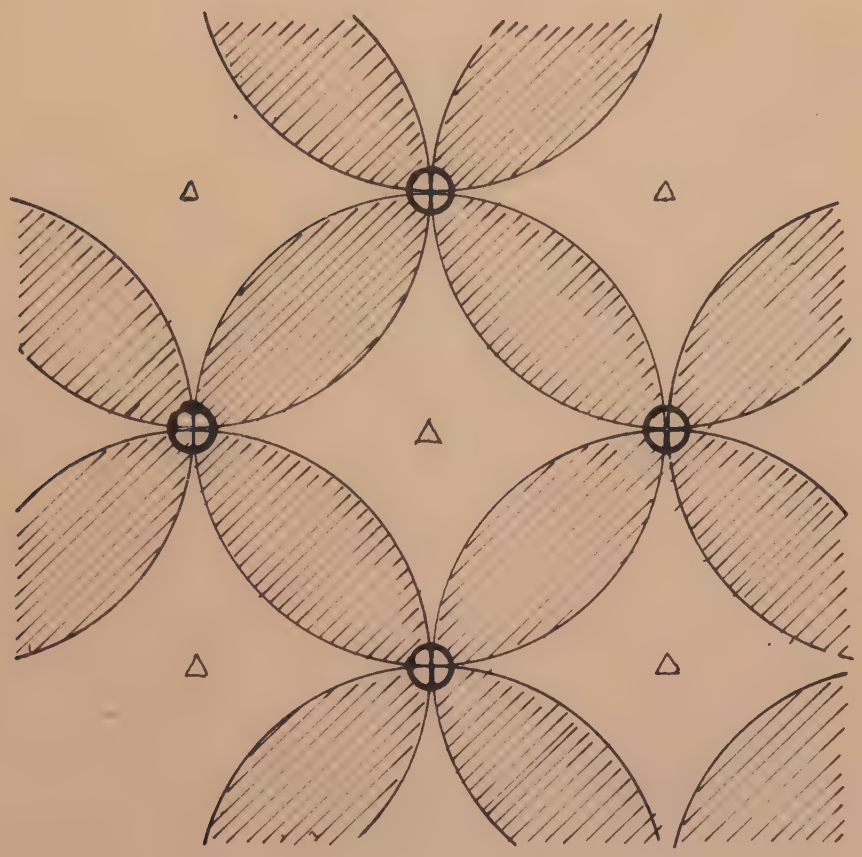


FIG. 13

SHEMA DU BALAYAGE SUPERFICIEL DANS LE CAS D'UNE IMPLANTATION EN "FIVE_SPOT"

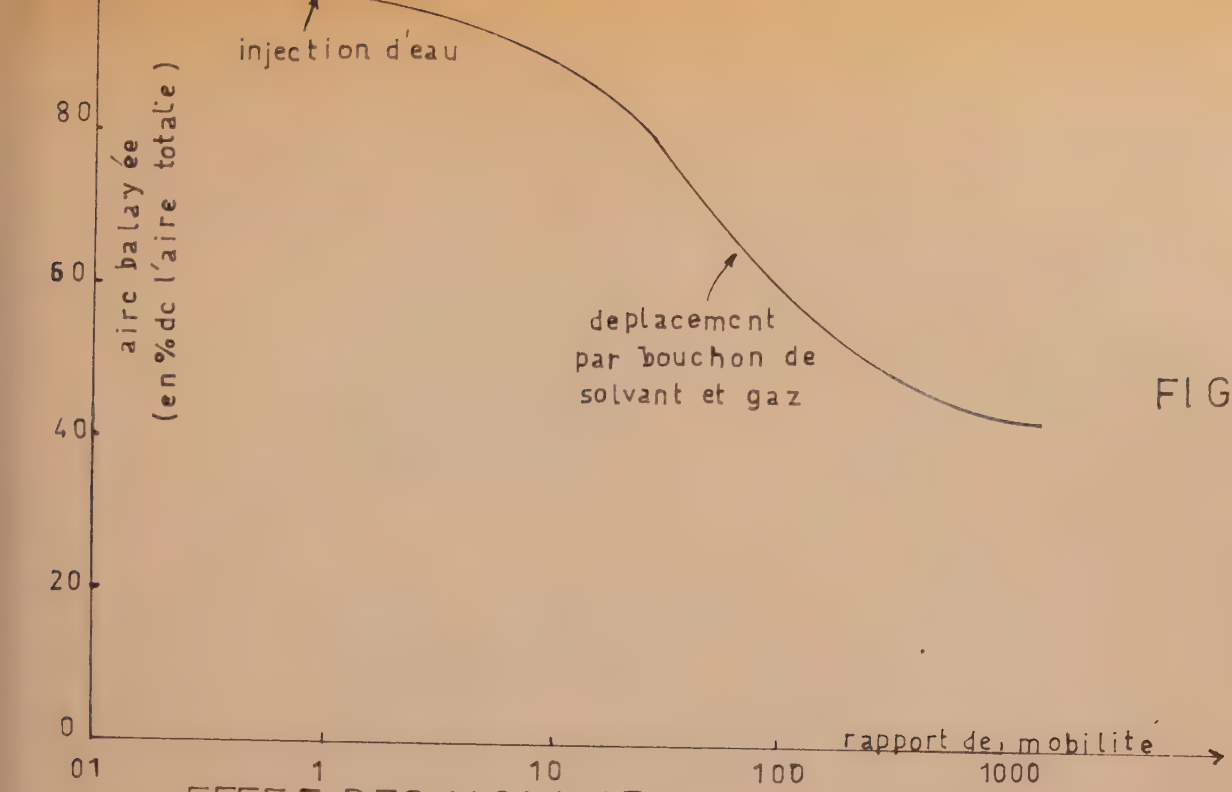


FIG.14

EFFET DES MOBILITES DES FLUIDES SUR L'EFFICACITÉ DE BALAYAGE SUPERFICIEL

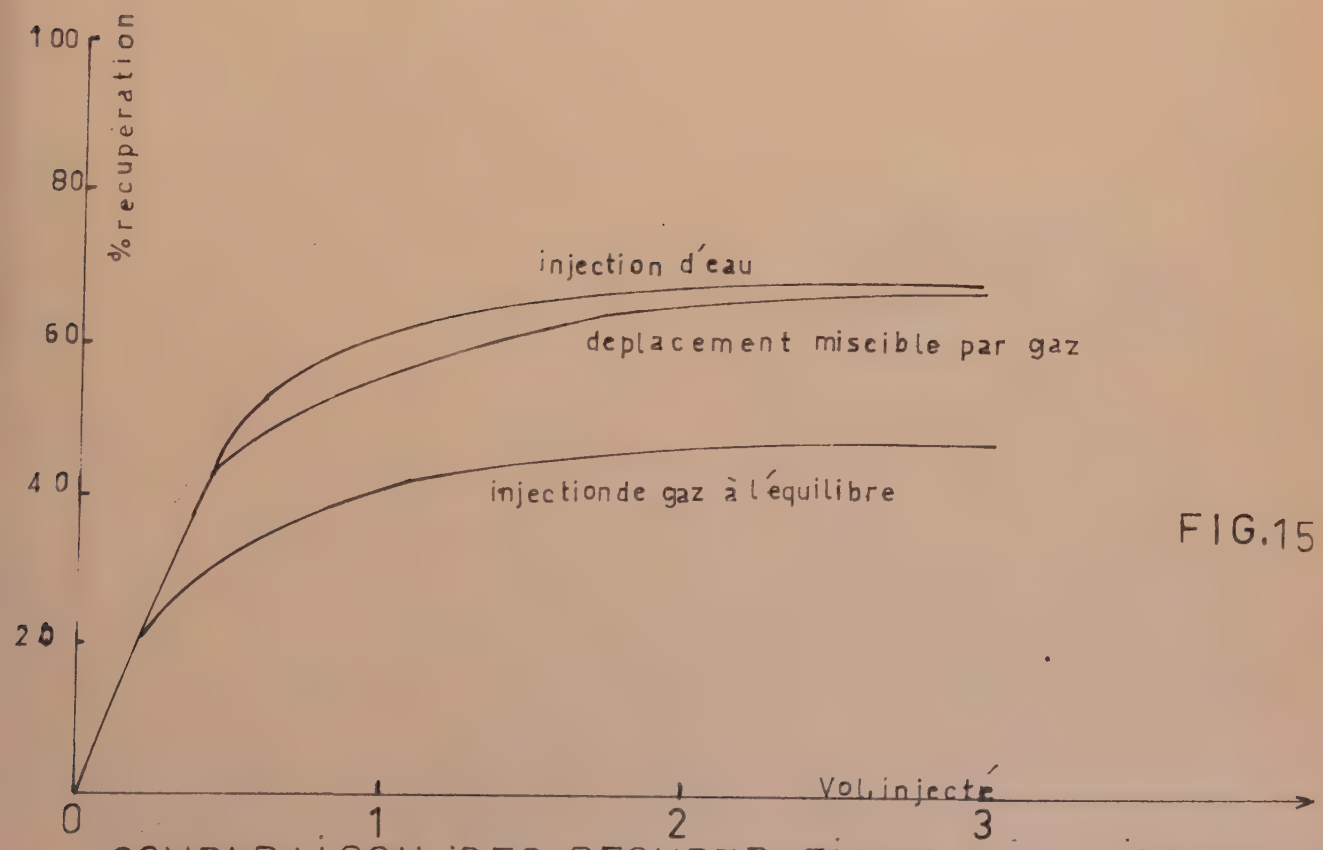


FIG.15

COMPARAISON DES RECUPERATIONS PAR DIFFERENTS PROCÉDÉS D'INJECTION

rapport de mobilité 20

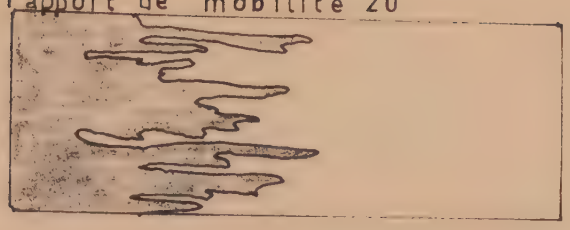


FIG. 16

rapport dc mobilité 383

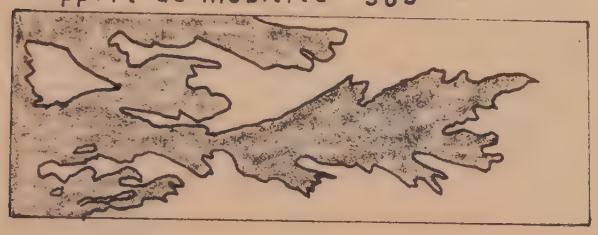


FIG. 17

DIGITATIONS

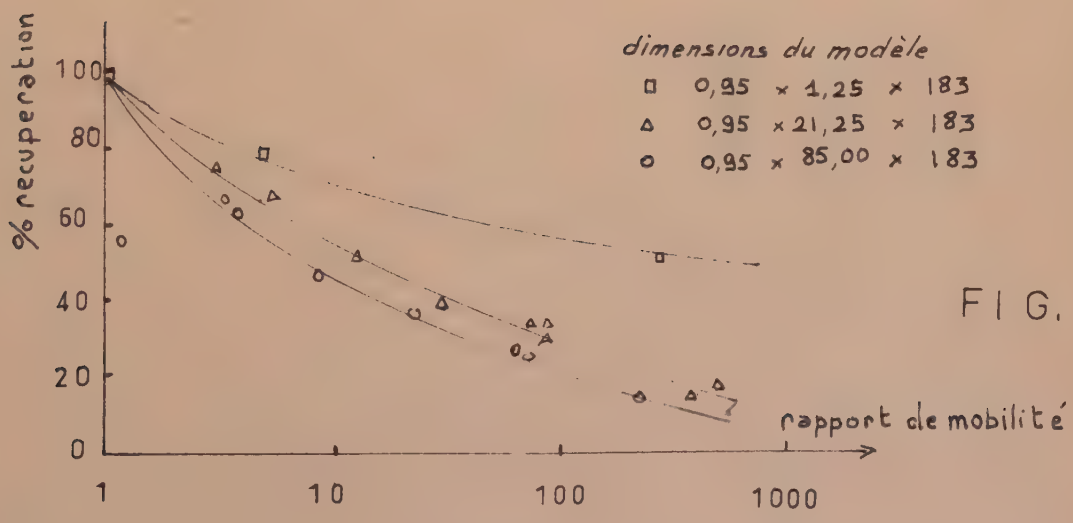


FIG. 18

EFFET DU RAPPORT DE MOBILITE
SUR LA RECUPERATION

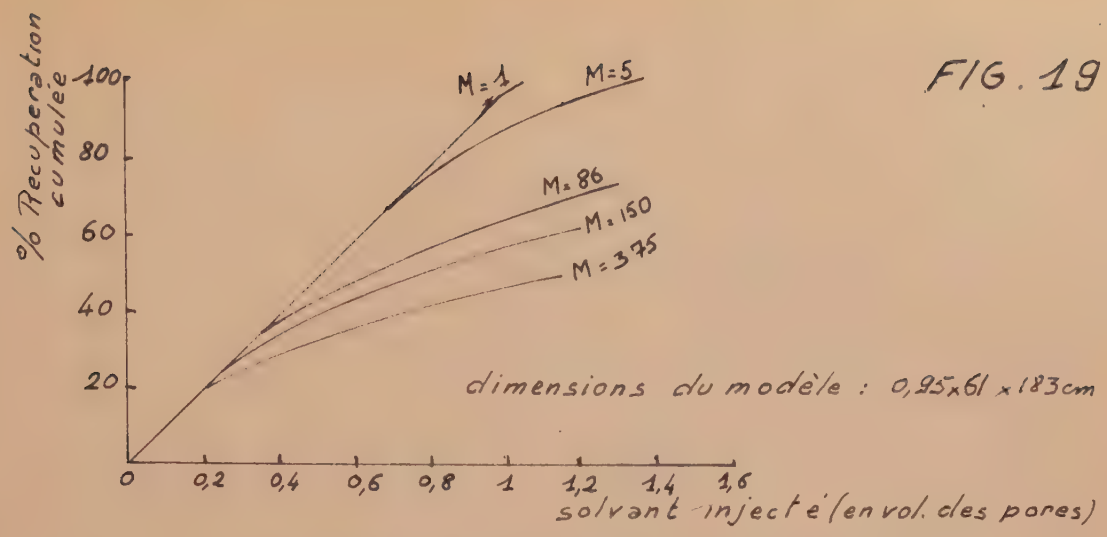


FIG. 19

EFFET DU RAPPORT DE MOBILITE
SUR LA RECUPERATION CUMULEE

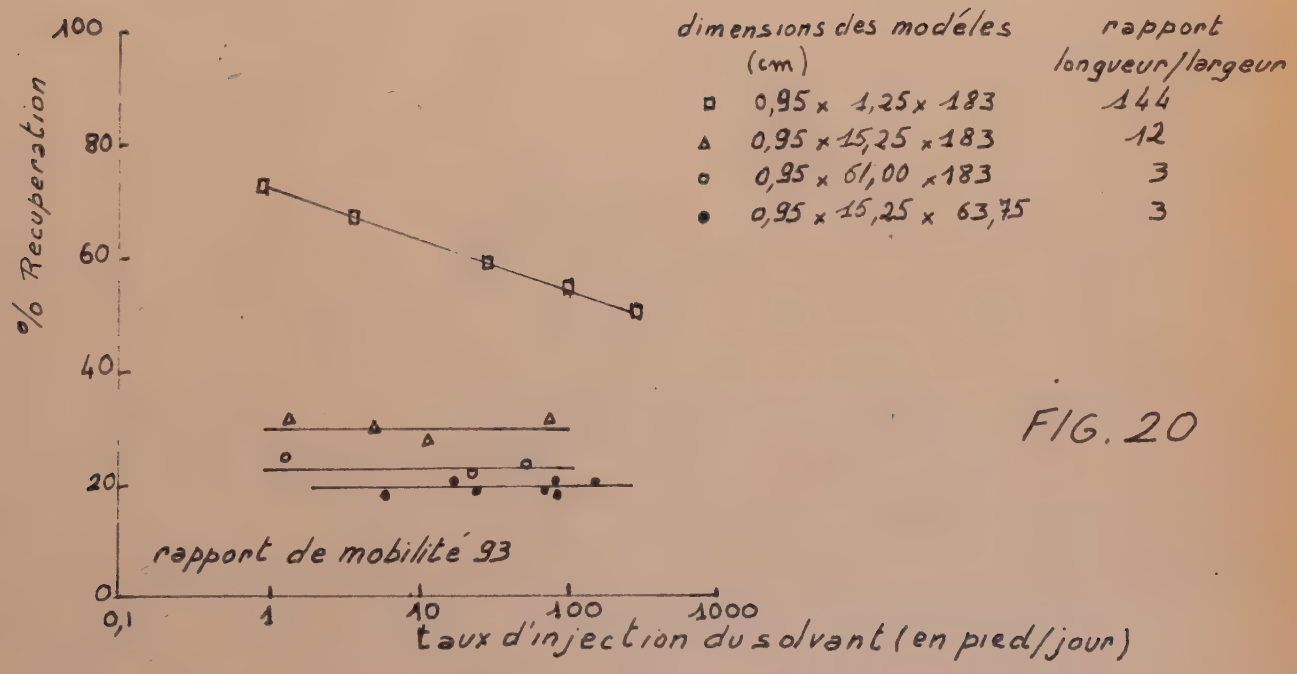


FIG. 20

EFFET DU TAUX D'INJECTION SUR LA
RECUPERATION A LA SORTIE DU GAZ

Figure : 21 Dessin d'un embout du milieu poreux

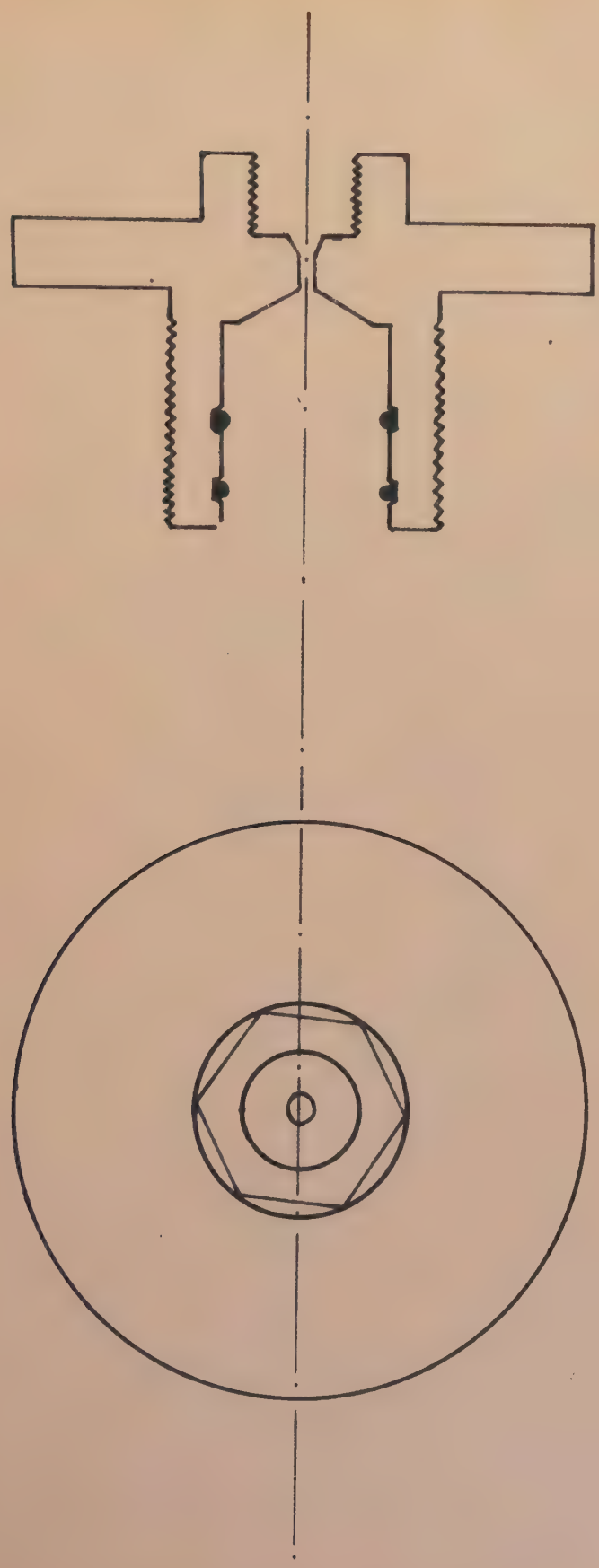


Figure: 22 Vue d'ensemble du support du milieu poreux

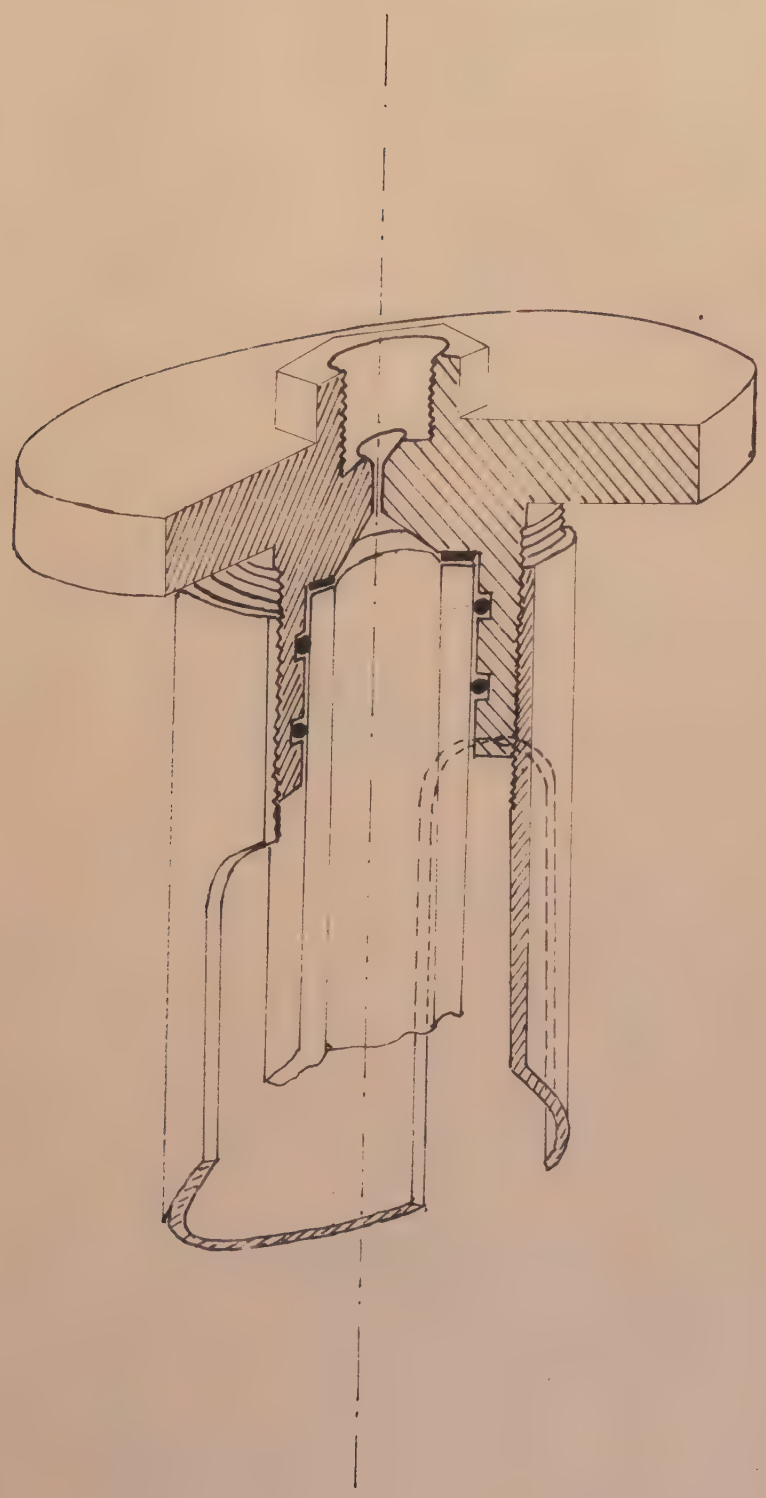


Figure : 23 Appareillage pour injection de butane par le haut

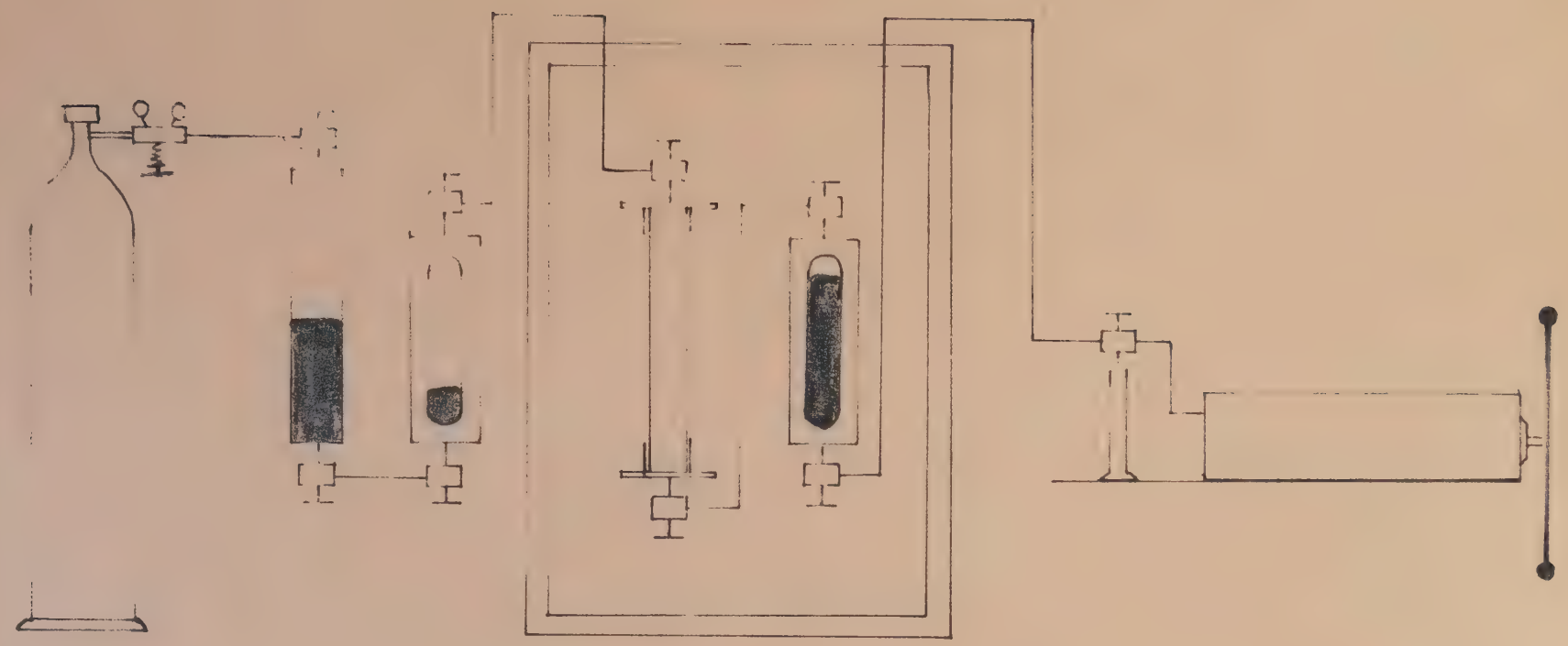


Figure : 24 Appareillage pour injection de butane par le bas

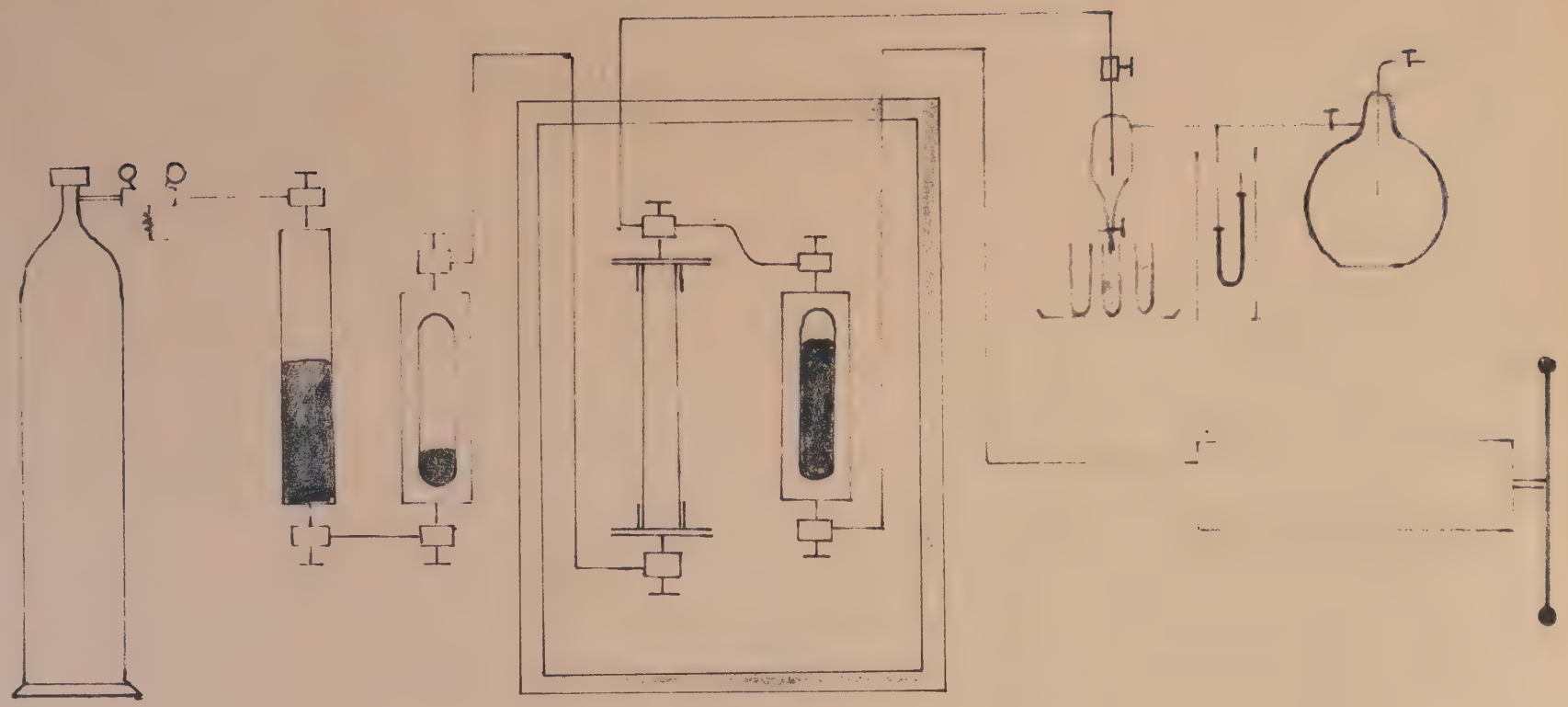
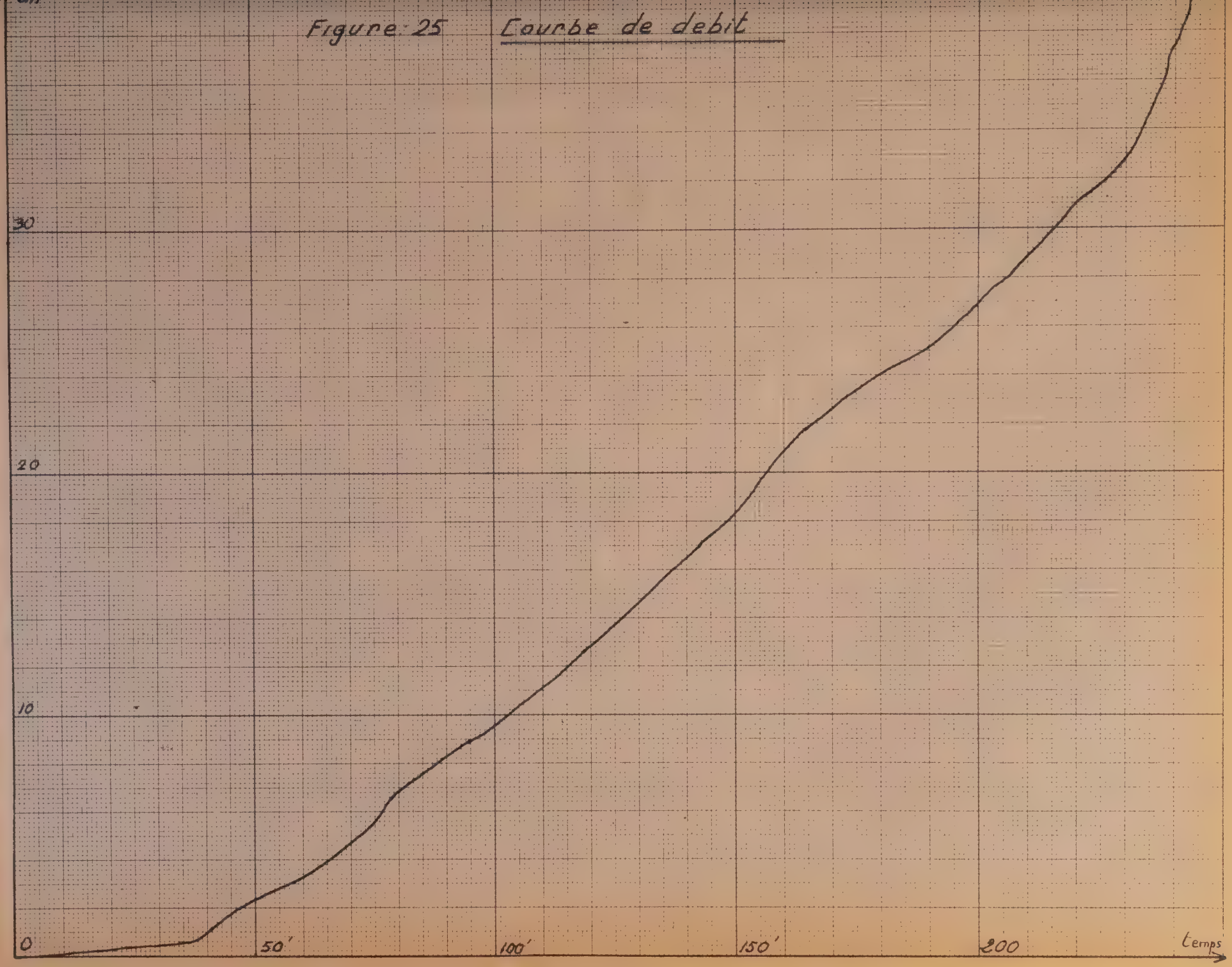


Figure 25 Courbe de debit



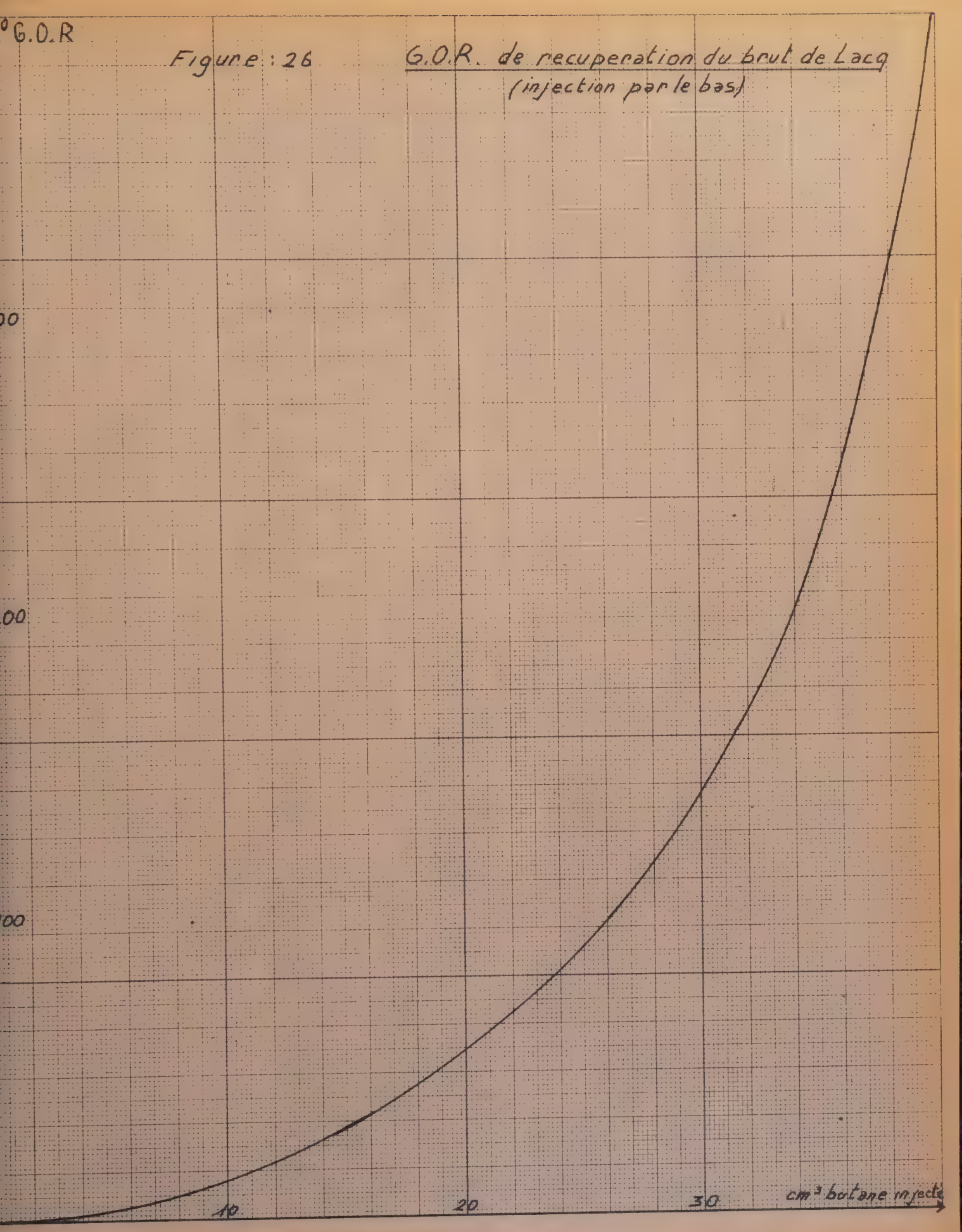

°G.O.R
Figure : 26
G.O.R. de recuperation du brut de Lacq
(injection par le bas)
00
00
00
10
20
30
cm³ butane injecté

Figure : 27 G.O.R de recuperation du brut de Lacq
(injection par le bas)

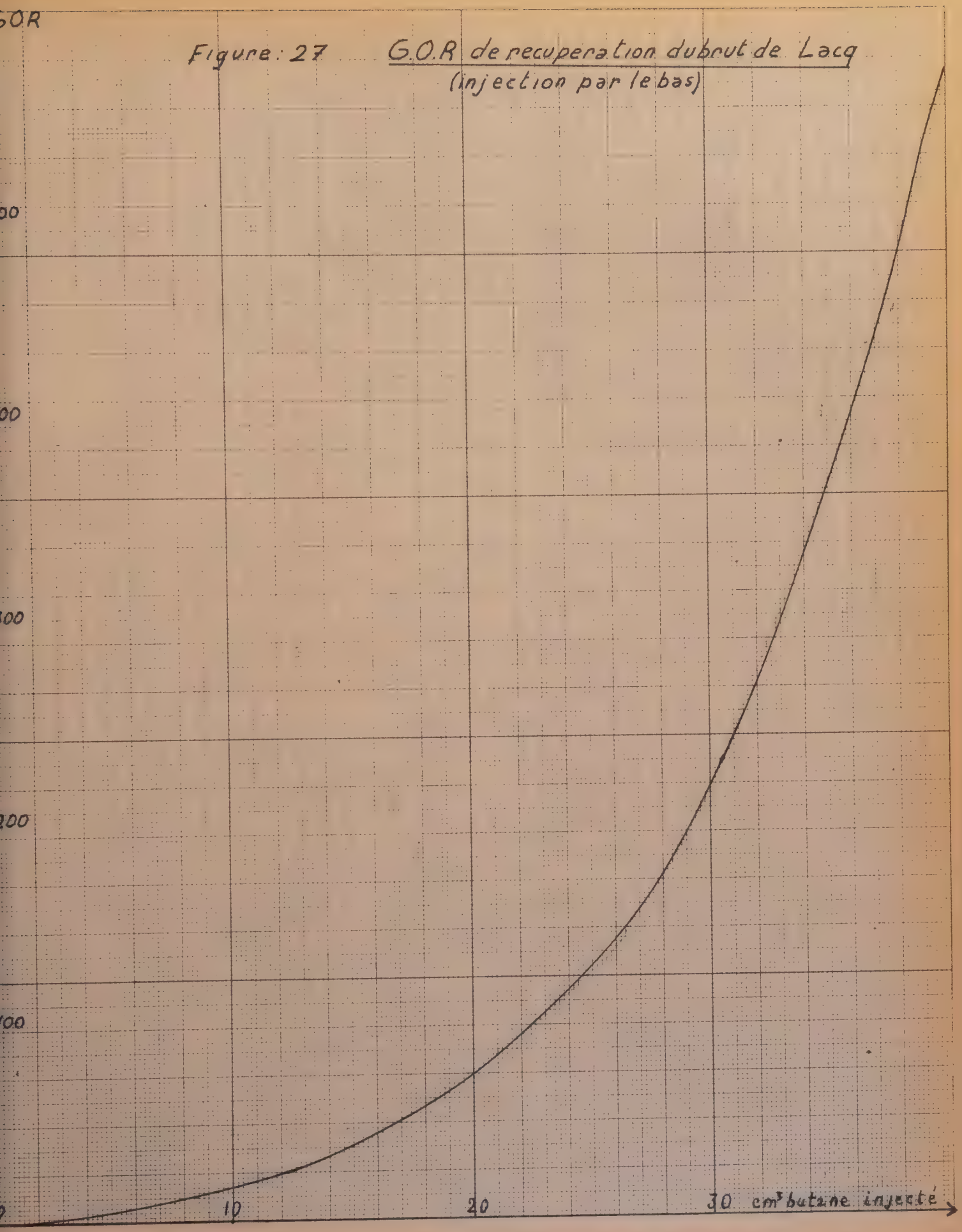


Figure: 28 Courbe de recuperation du brut de Lacq
(injection par le bas)

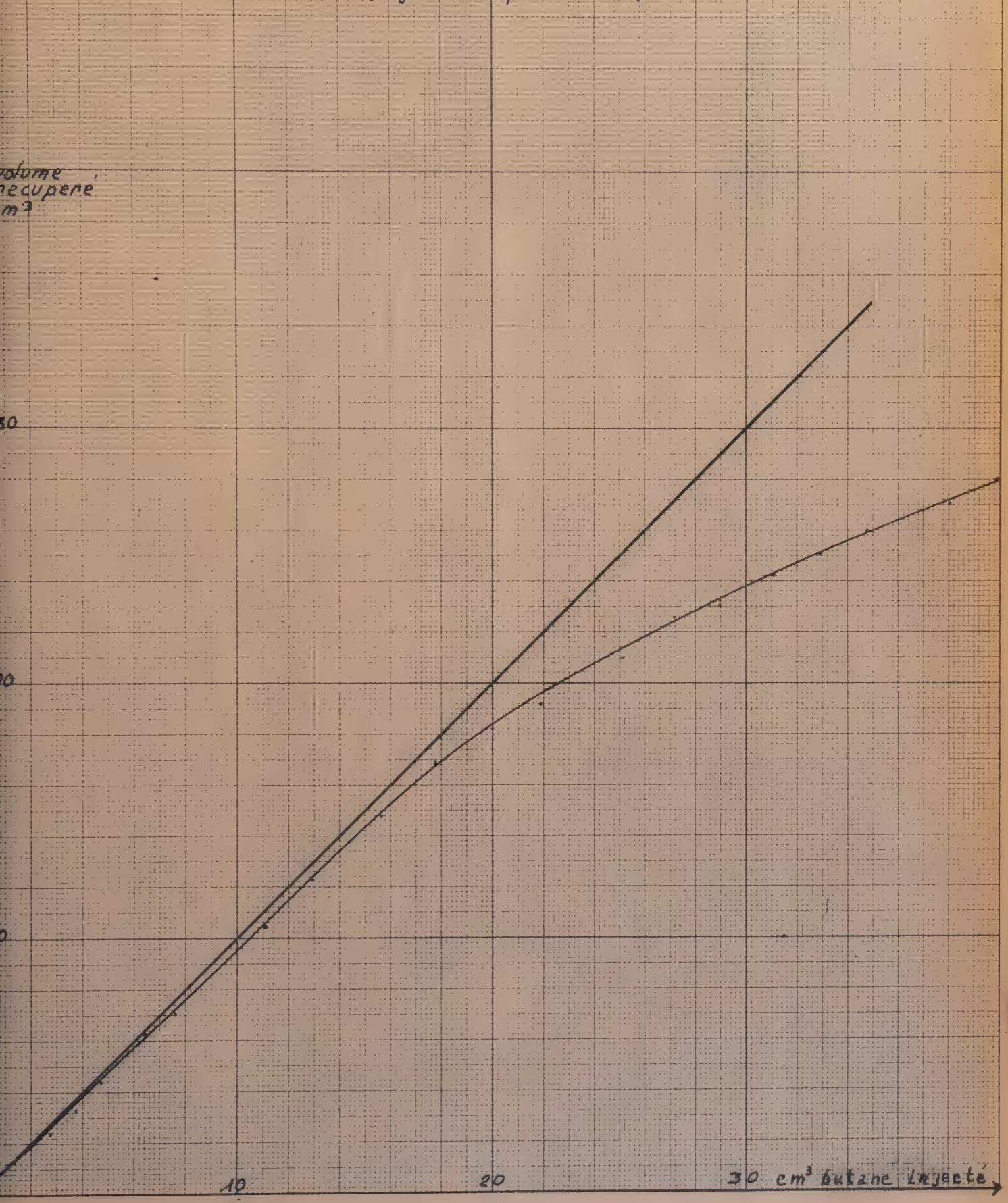


Figure 29 Evolution des asphaltènes dans le brut recuperé

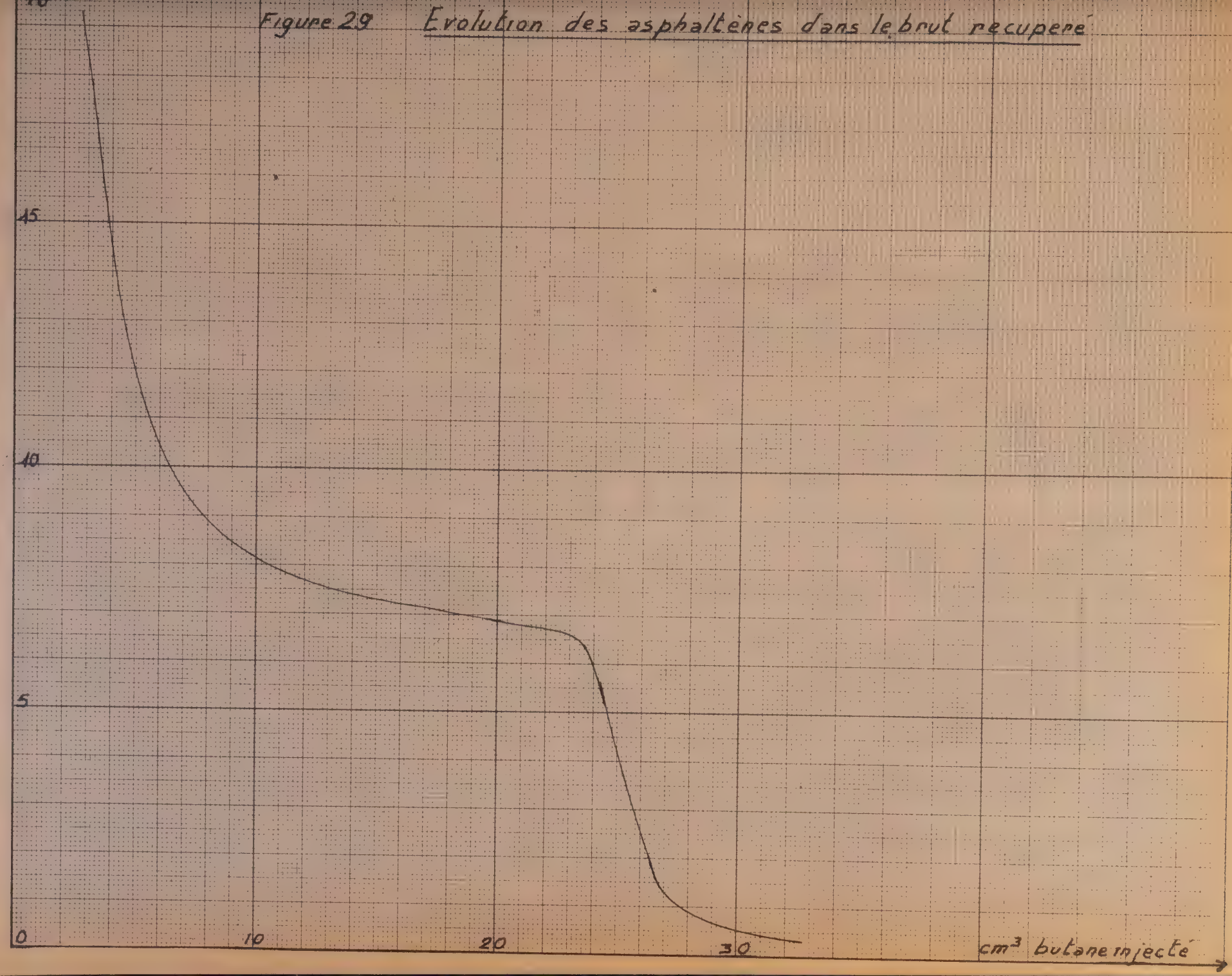
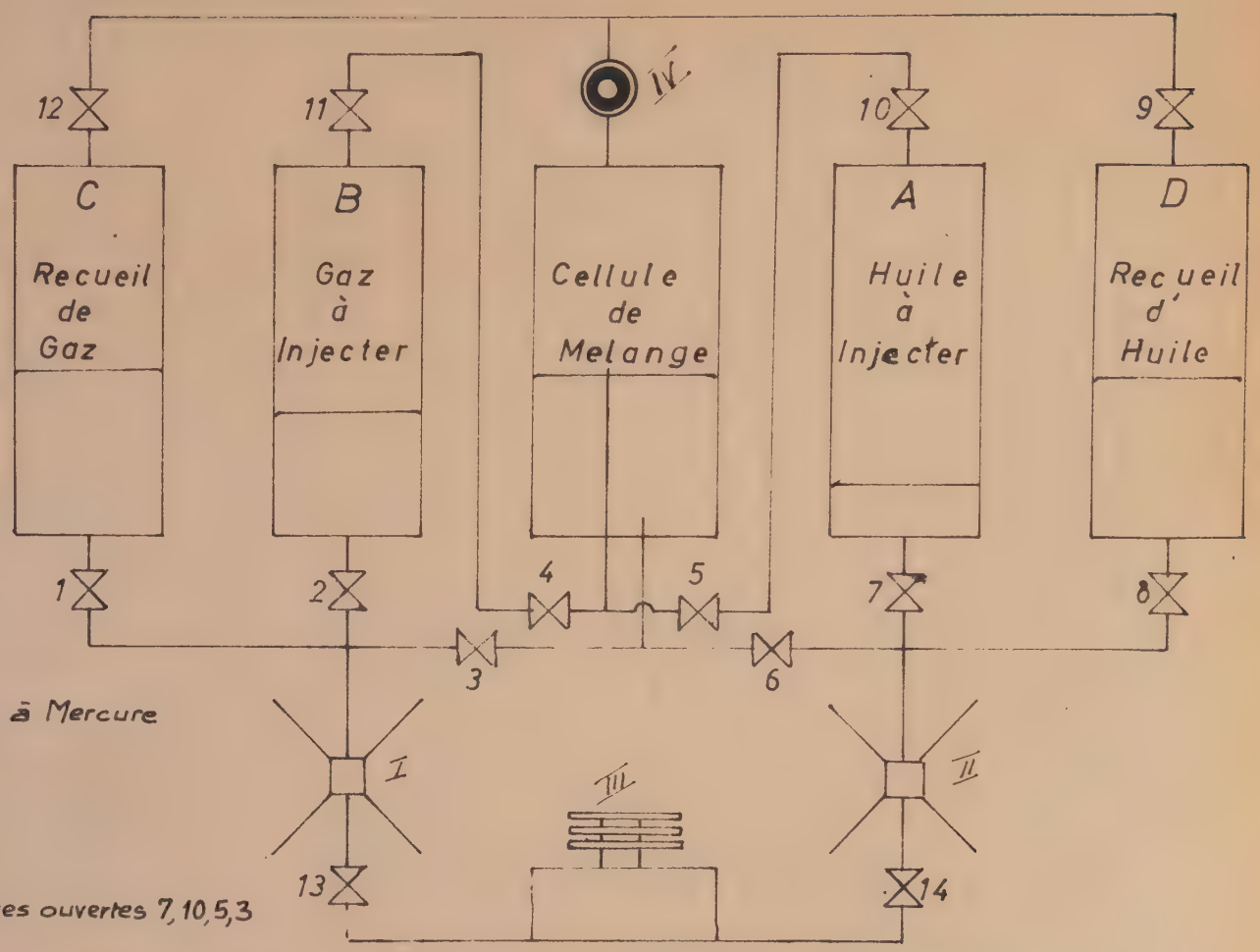


FIGURE: 30

APPAREILLAGE



I, II Pompes Volumétriques à Mercure

III Balance de Pression

IV Cellule à fenêtre

Injection d'huile { Poussée II vannes ouvertes 7, 10, 5, 3 ; Retrait I

Injection de Gaz { Poussée I ; Retrait II vannes ouvertes 2, 11, 4, 6

Recueil de Gaz { Poussée II ; Retrait I vannes ouvertes 6, 12, 1

Recueil d'huile { Poussée I ; Retrait II vannes ouvertes 3, 9, 8

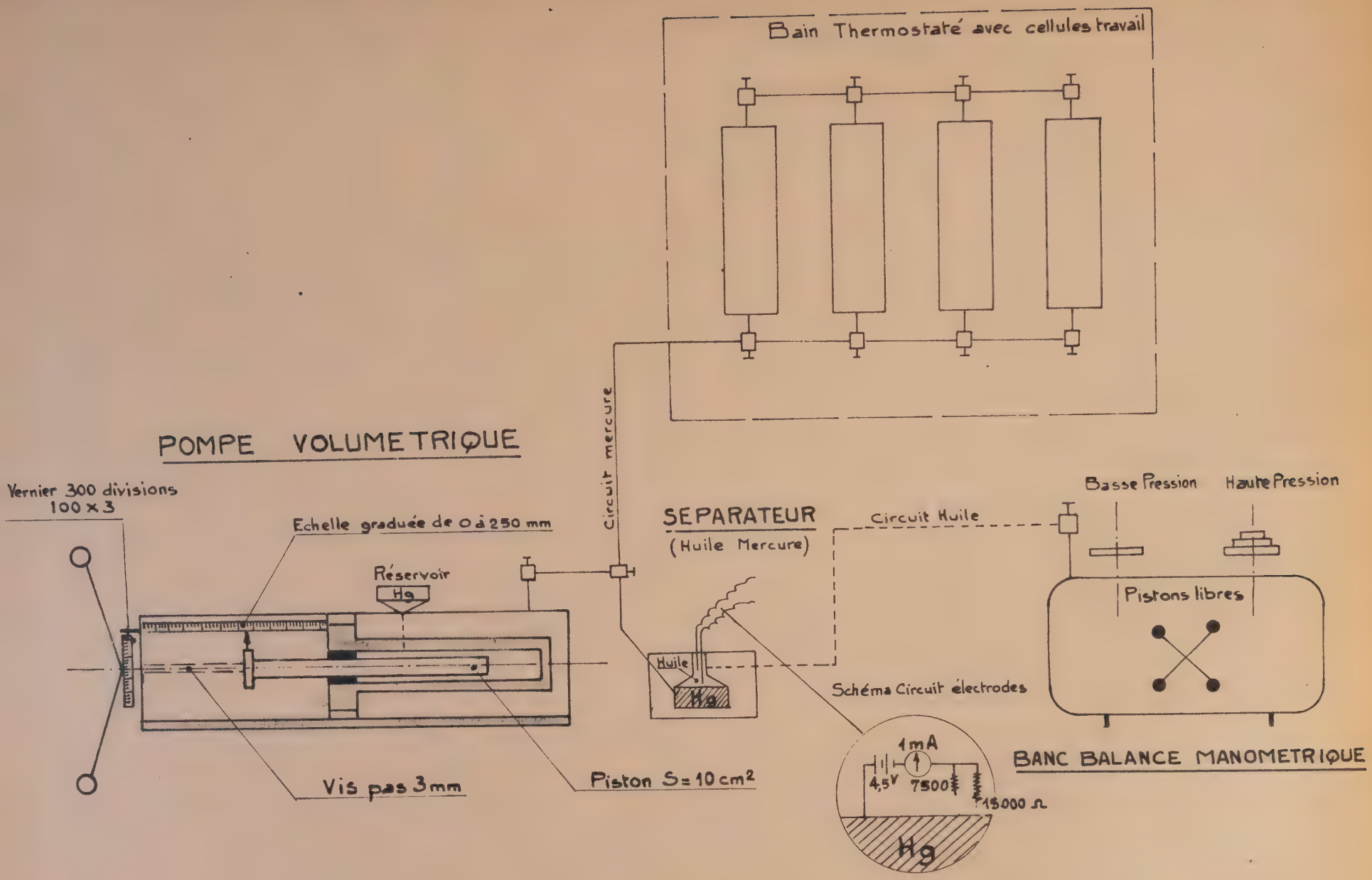
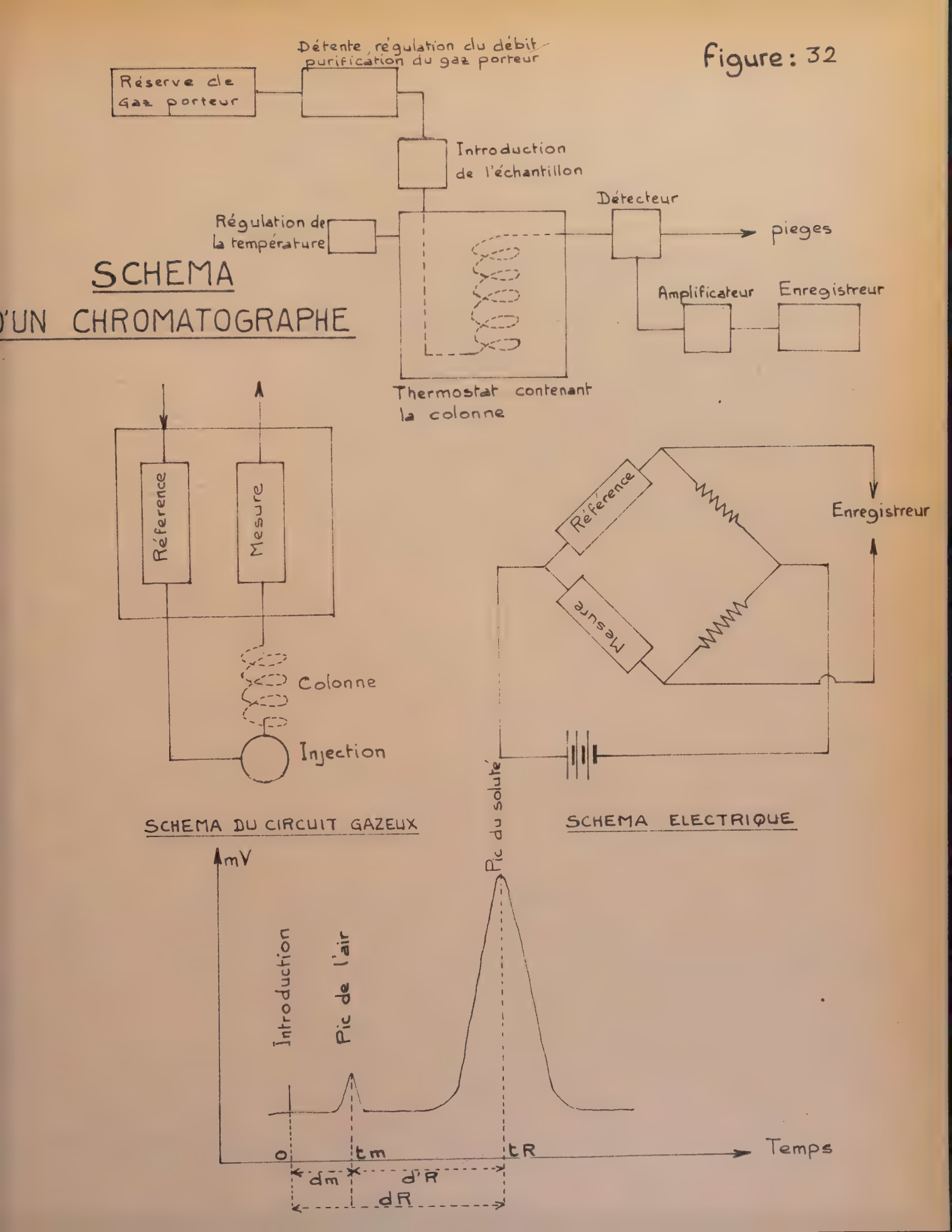

Bain Thermostaté avec cellules travail
Circuit mercure
POMPE VOLUMETRIQUE
Vernier 300 divisions
100 x 3
Echelle graduée de 0 à 250 mm
Réservoir
Hg
Vis pas 3mm
Piston S = 10 cm²
SEPARATEUR
(Huile Mercure)
Huile
Hg
Circuit Huile
Schéma Circuit électrodes
1mA
4,5V
7500
15000 Ω
Hg
Basse Pression
Haute Pression
Pistons libres
BANC BALANCE MANOMETRIQUE

Figure : 31

Figure : 32

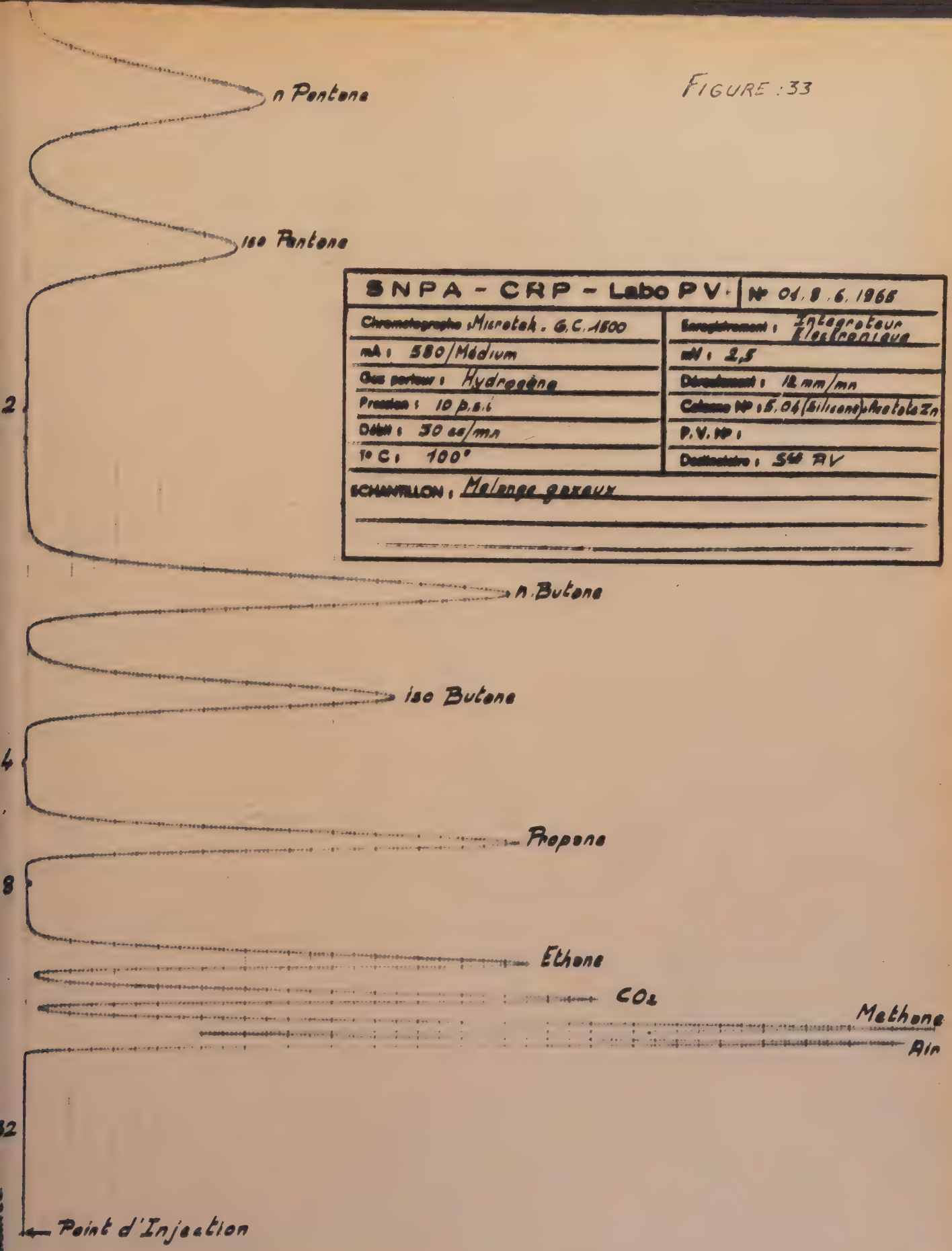


SCHEMA D'UN CHROMATOGRAPHE

SCHEMA DU CIRCUIT GAZEUX

SCHEMA ELECTRIQUE

FIGURE : 33



SNPA - CRP - Labo PV	N° 01.8.6.1965
Chromatographe : Microtek . G.C. 1500	Enregistrement : Integrateur Electronique
mA : 580/Médium	mV : 2,5
Gaz porteur : Hydrogène	Déroulement : 12 mm/mn
Pression : 10 p.s.i	Colonne N° : 5.04 (Silicone) + Acetate Zn
Débit : 30 cc/mn	P.V. N° :
T° C : 100°	Destinataire : Sté AV
ECHANTILLON : Melange gazeux	

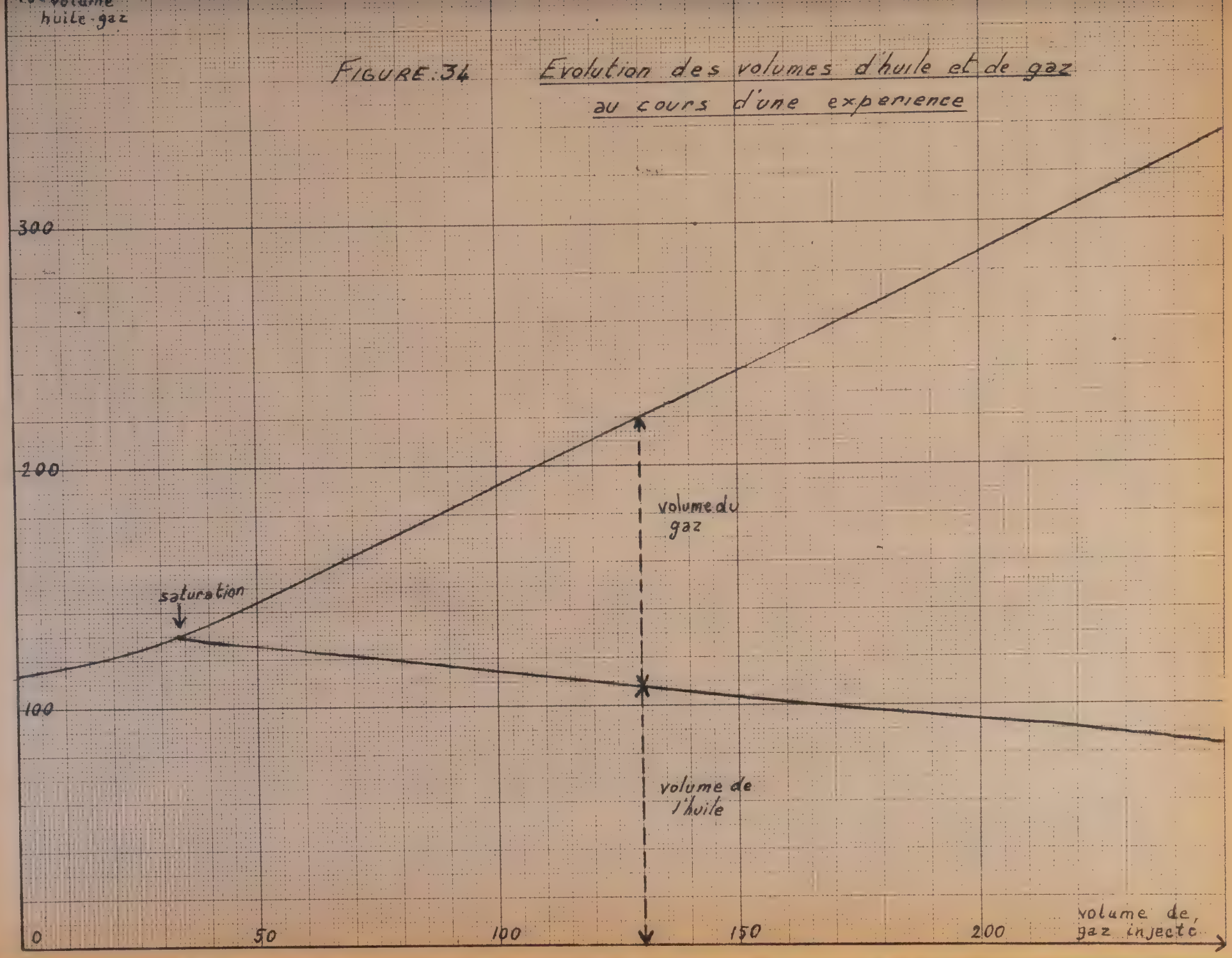


FIGURE: 34 Evolution des volumes d'huile et de gaz au cours d'une experience

FIGURE: 35 Evolution du % des C_1 dans le gaz

(Zone gaz vaporisant de l'huile)

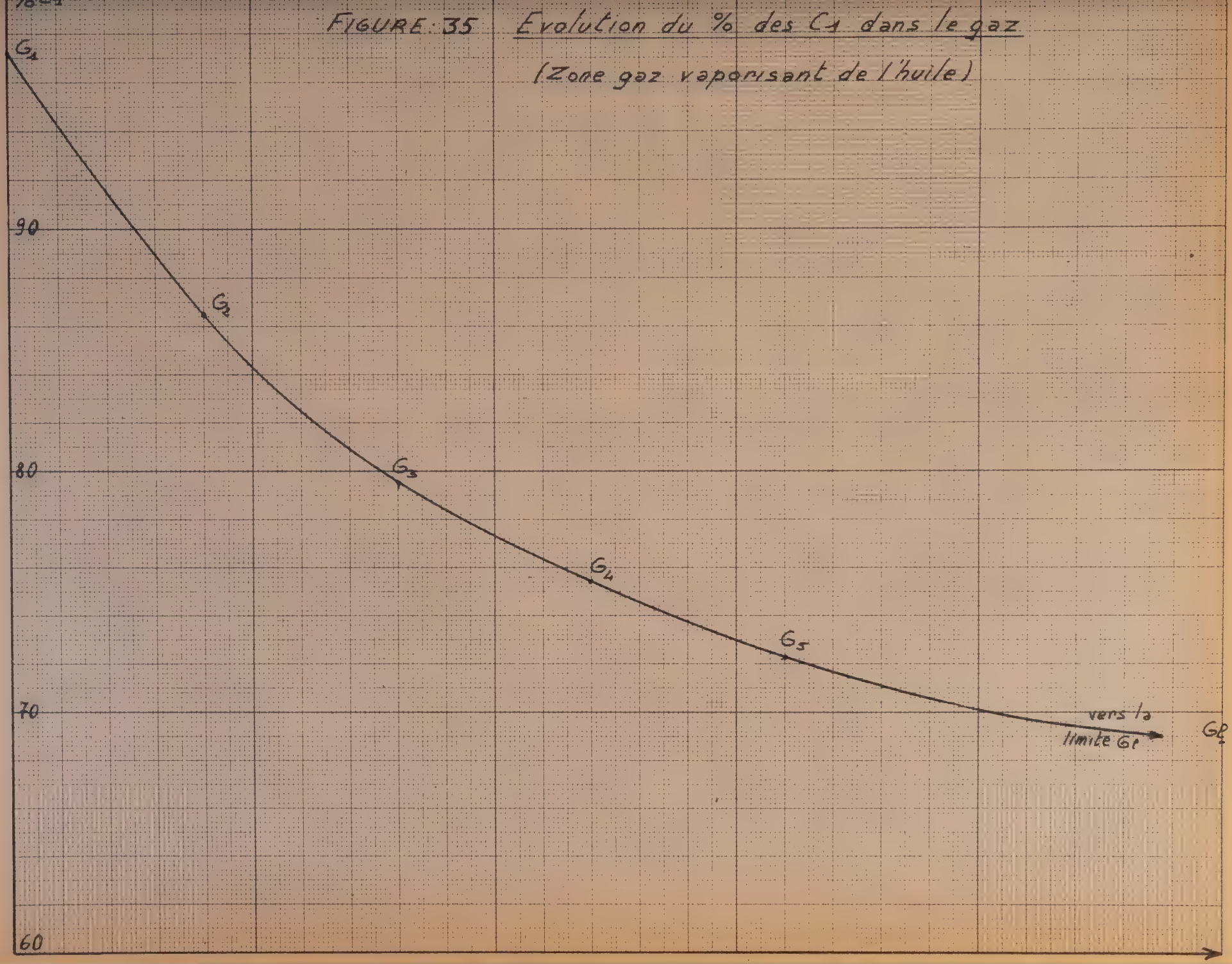
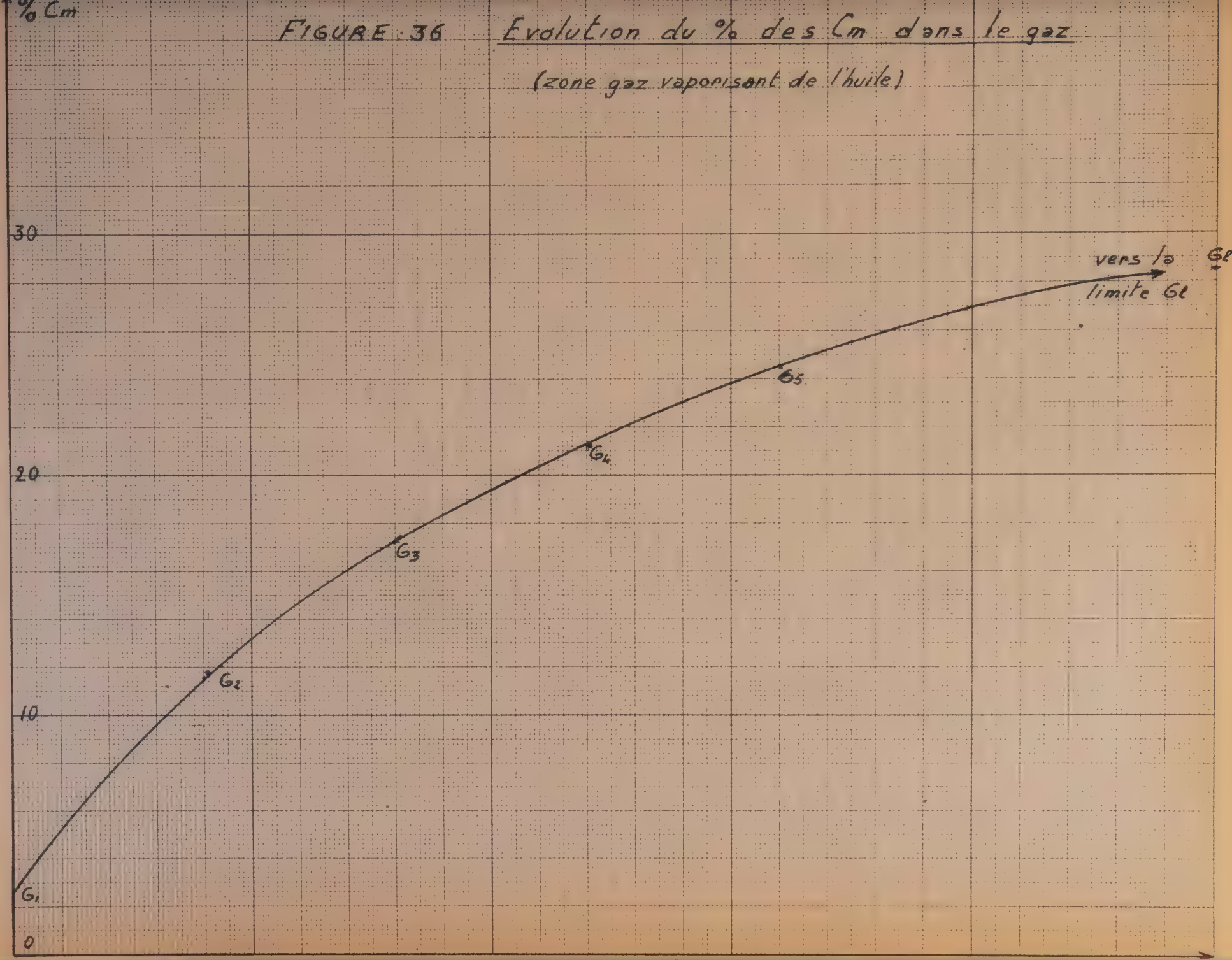


FIGURE 36 Evolution du % des Cm dans le gaz

(zone gaz vaporisant de l'huile)



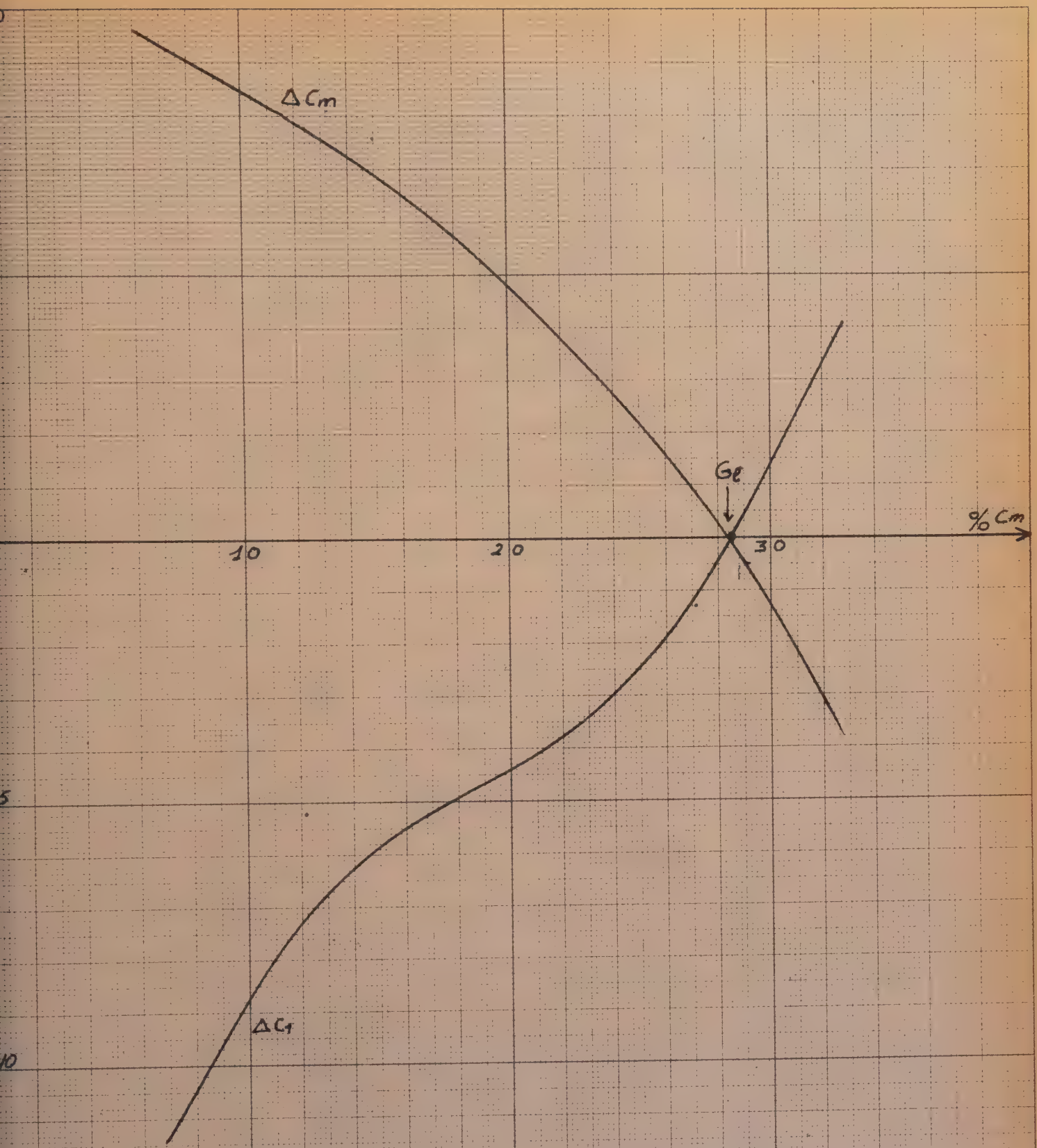


FIGURE : 37 Determination du % de Cm dans le gaz Gℓ

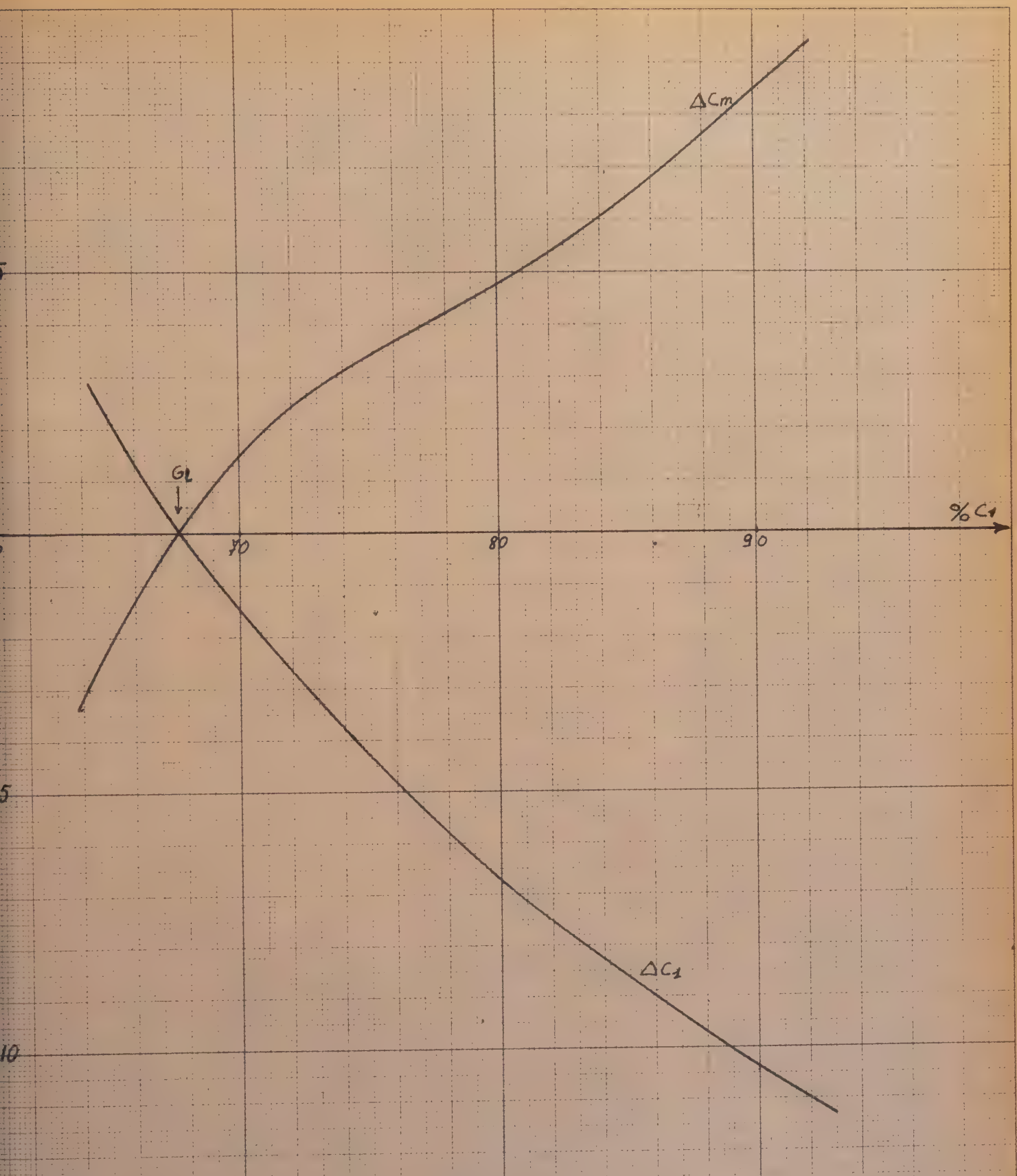


FIGURE: 38 Determination du % de G dans le gaz Gl

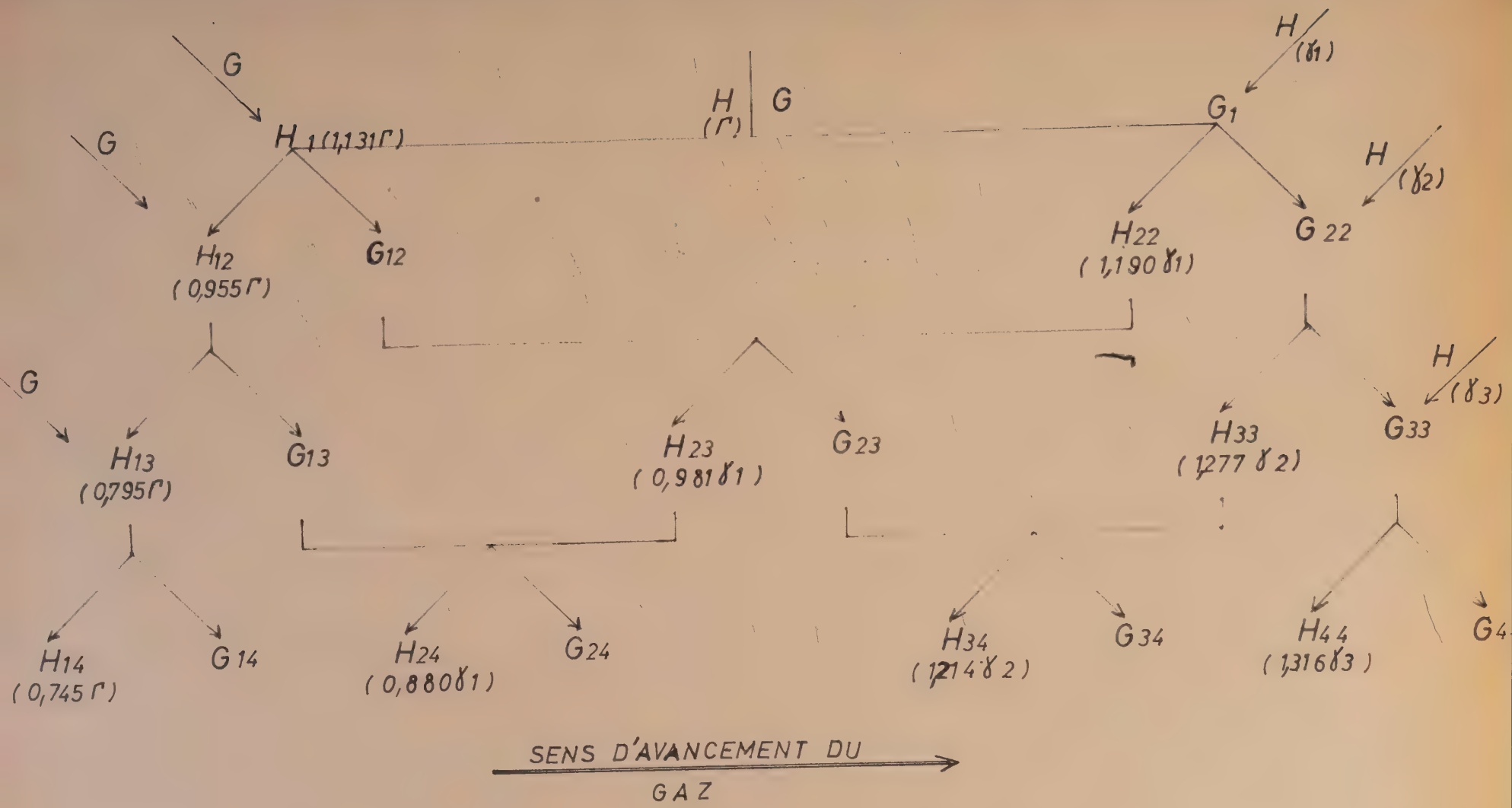


FIGURE : 39 SCHEMA D'OBTENTION DES DIFFERENTS EQUILIBRES AU COURS DE L'ETAPE " GAZ SE CONDENSANT DANS L'HUILE "

(les volumes sont indiques entre parenthèses)

FIGURE 40

Enrichissement de l'huile au cours de l'étape : "gaz se condensant dans l'huile"

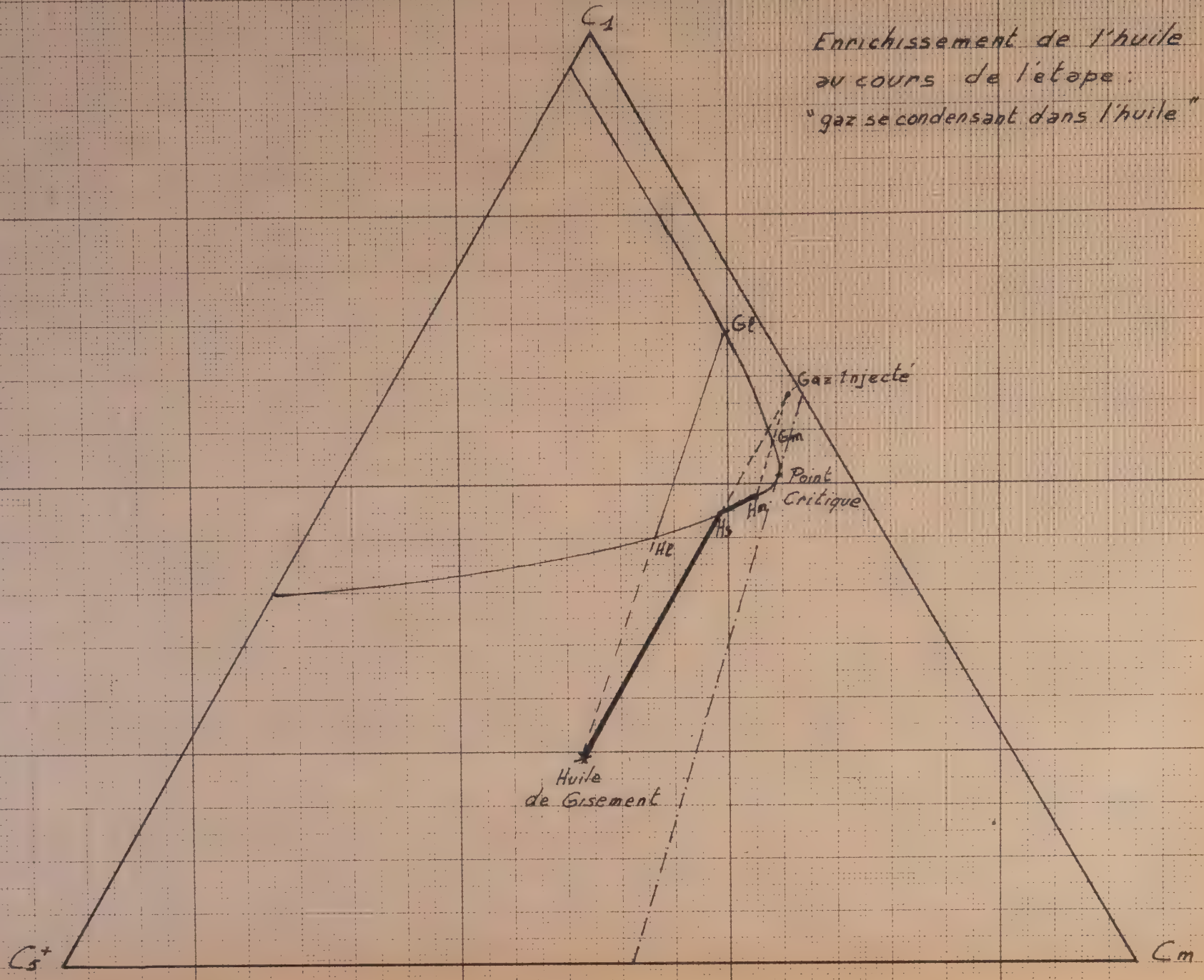
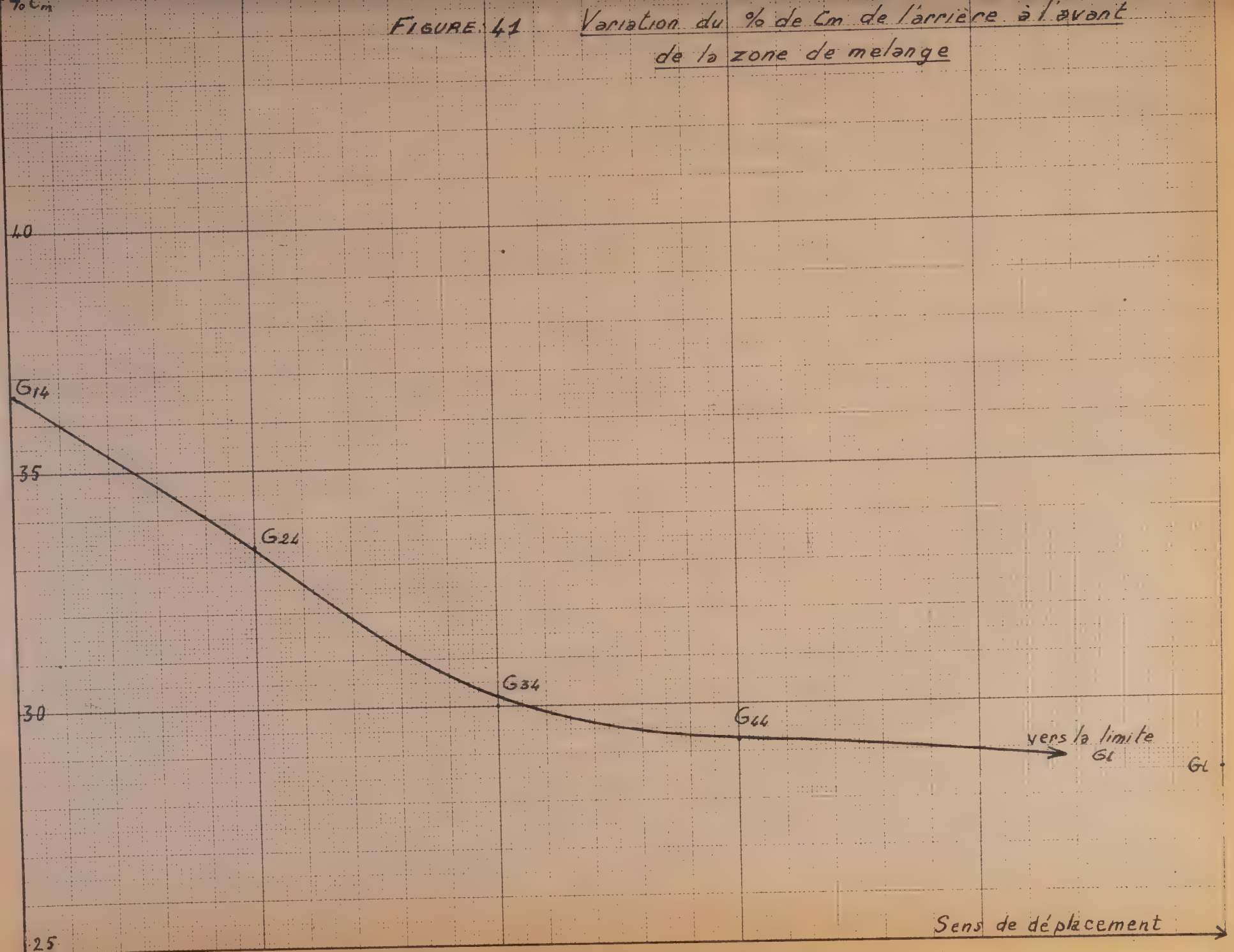


FIGURE 41 Variation du % de Cm de l'arrière à l'avant de la zone de melange



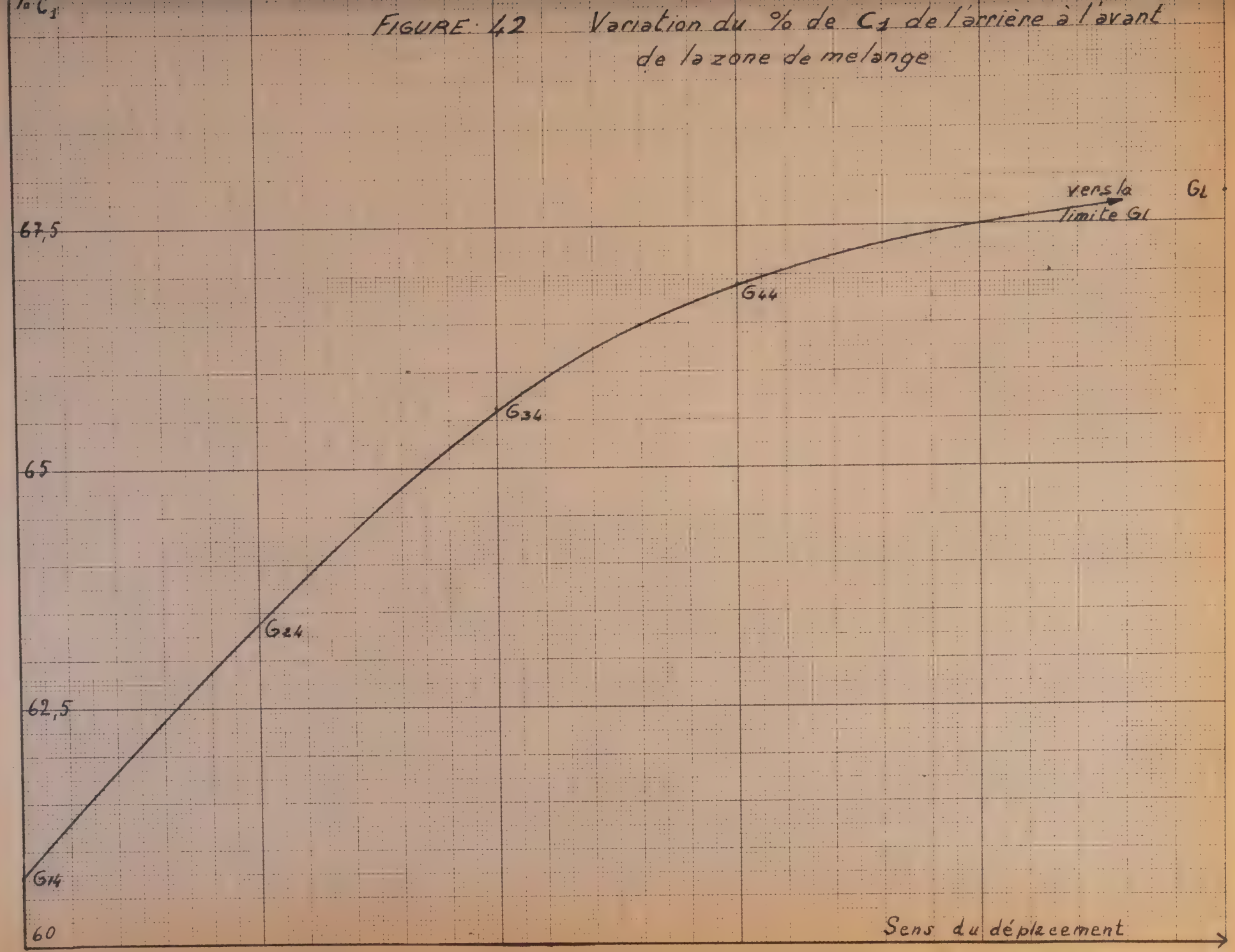


FIGURE 42 Variation du % de C_1 de l'arrière à l'avant de la zone de melange

FIGURE: 43 Variation du % de Cm de l'arrière à l'avant de la zone de melange (au cours de la 3ᵉ etape)

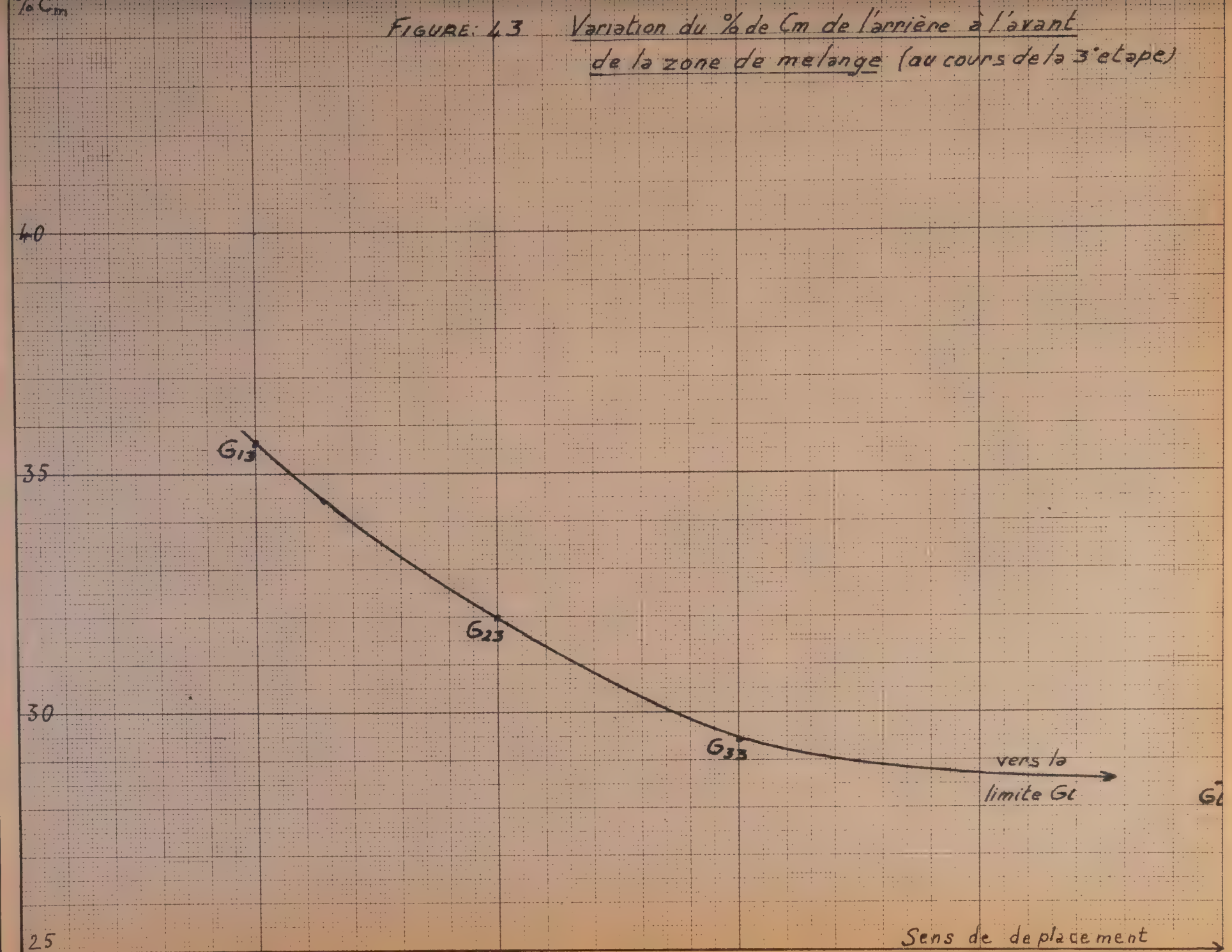
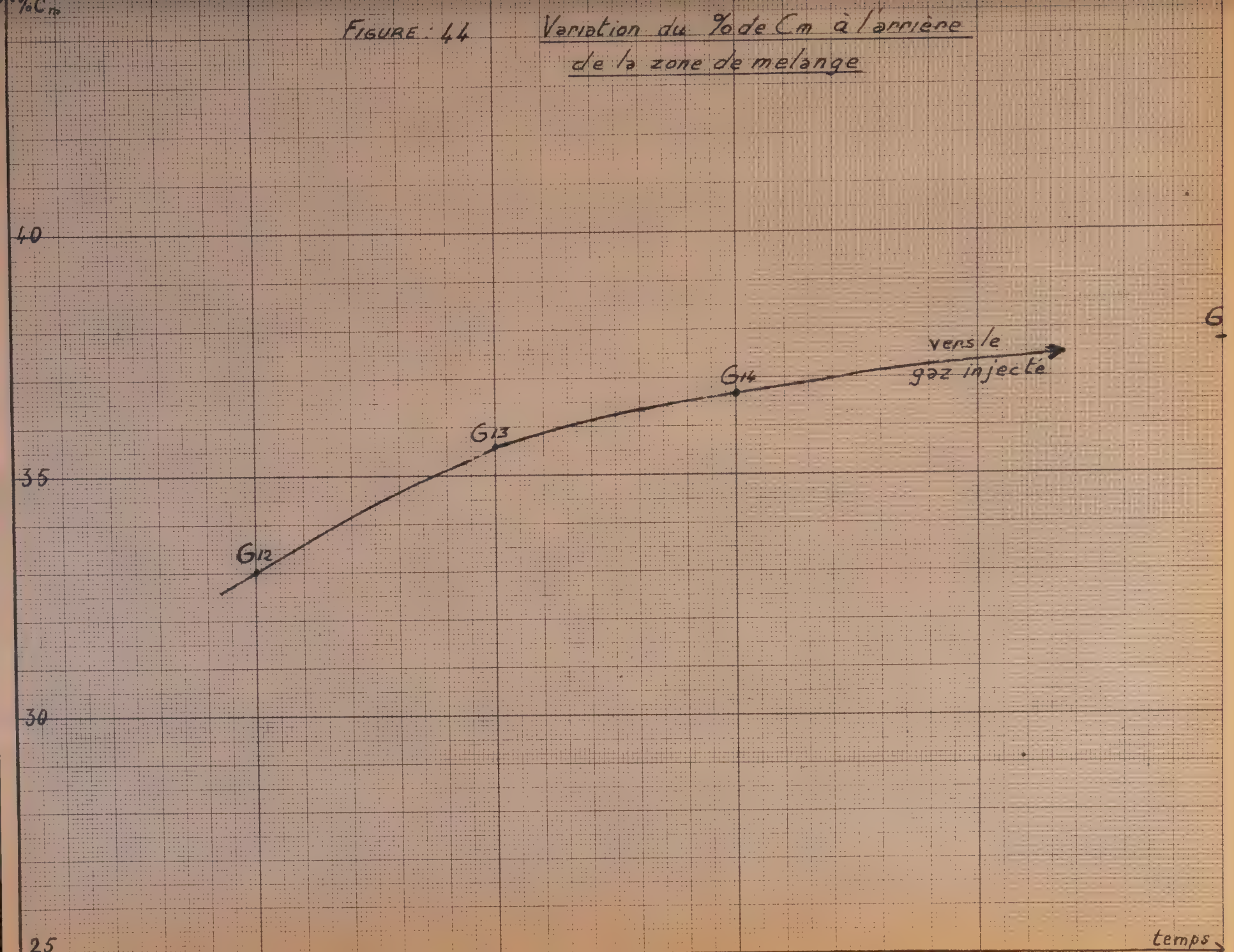


FIGURE : 44 Variation du % de Cm à l'arrière de la zone de melange



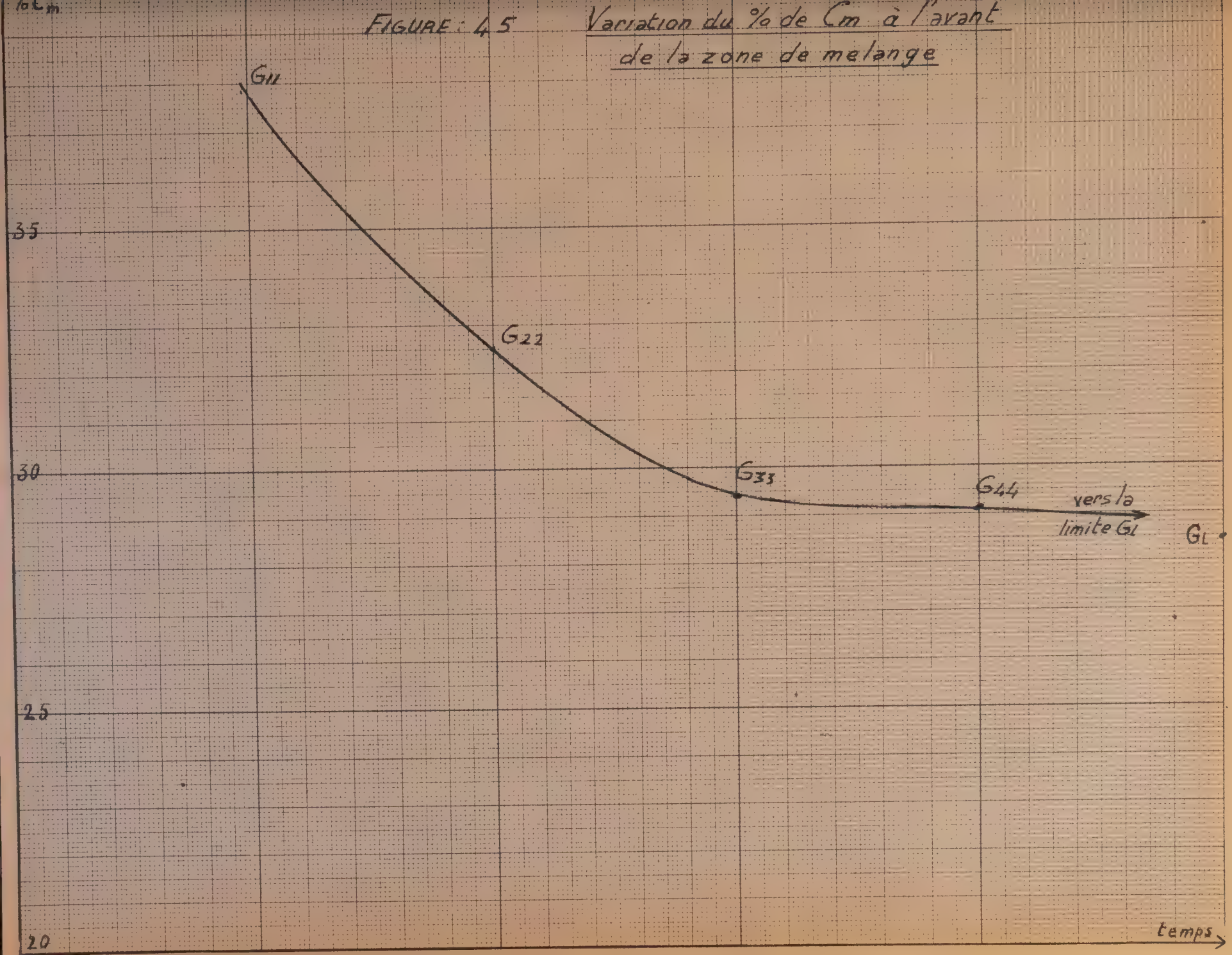


FIGURE : 45
Variation du % de Cm à l'avant de la zone de melange
% Cm
35
30
25
20
G11
G22
G33
G44
vers la limite GL
GL
temps

FIGURE: 46

Gonflement dans le temps de l'huile en avant de la zone de melange

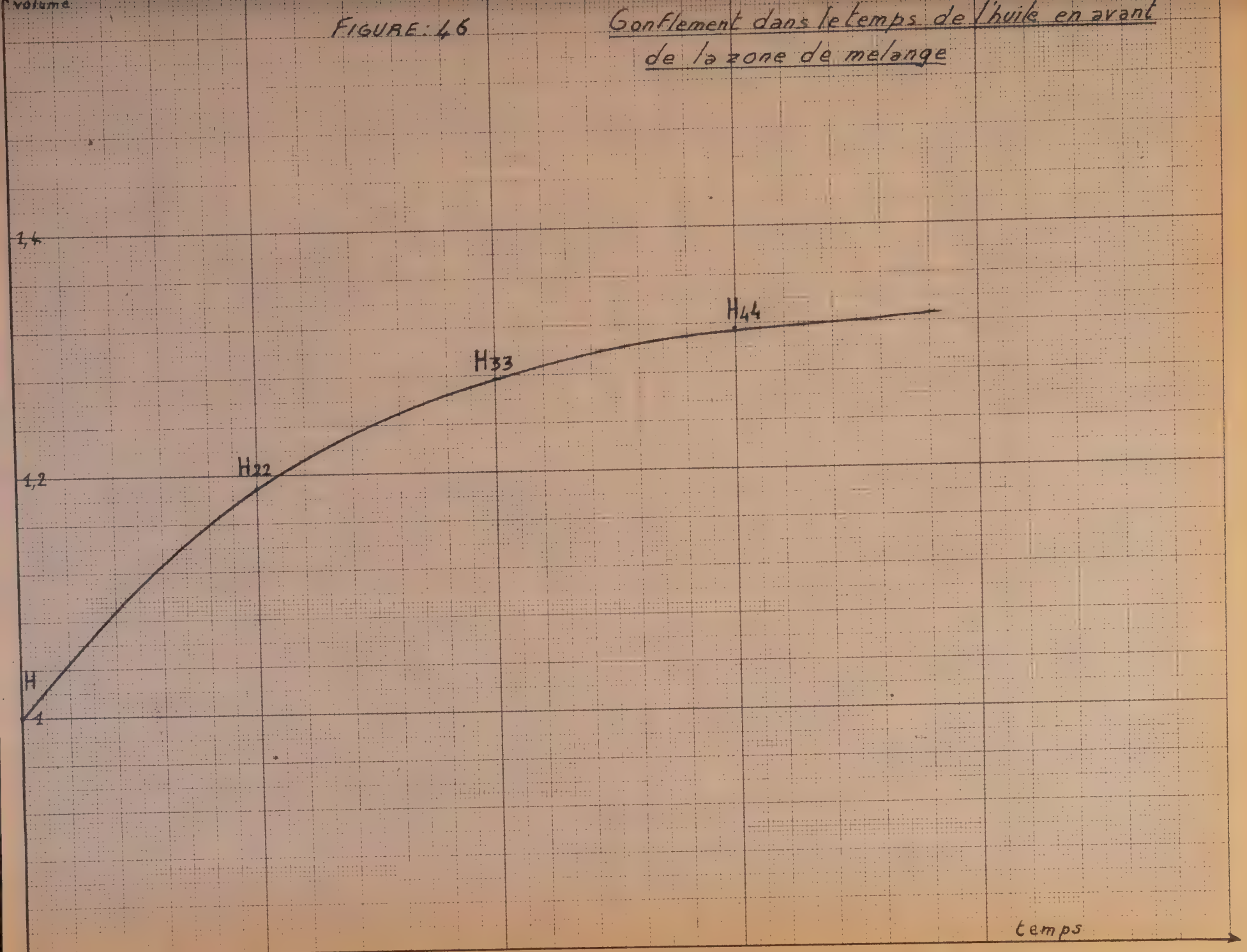


FIGURE : 47 Variation dans le temps du volume de l'huile en arrière de la zone de melange

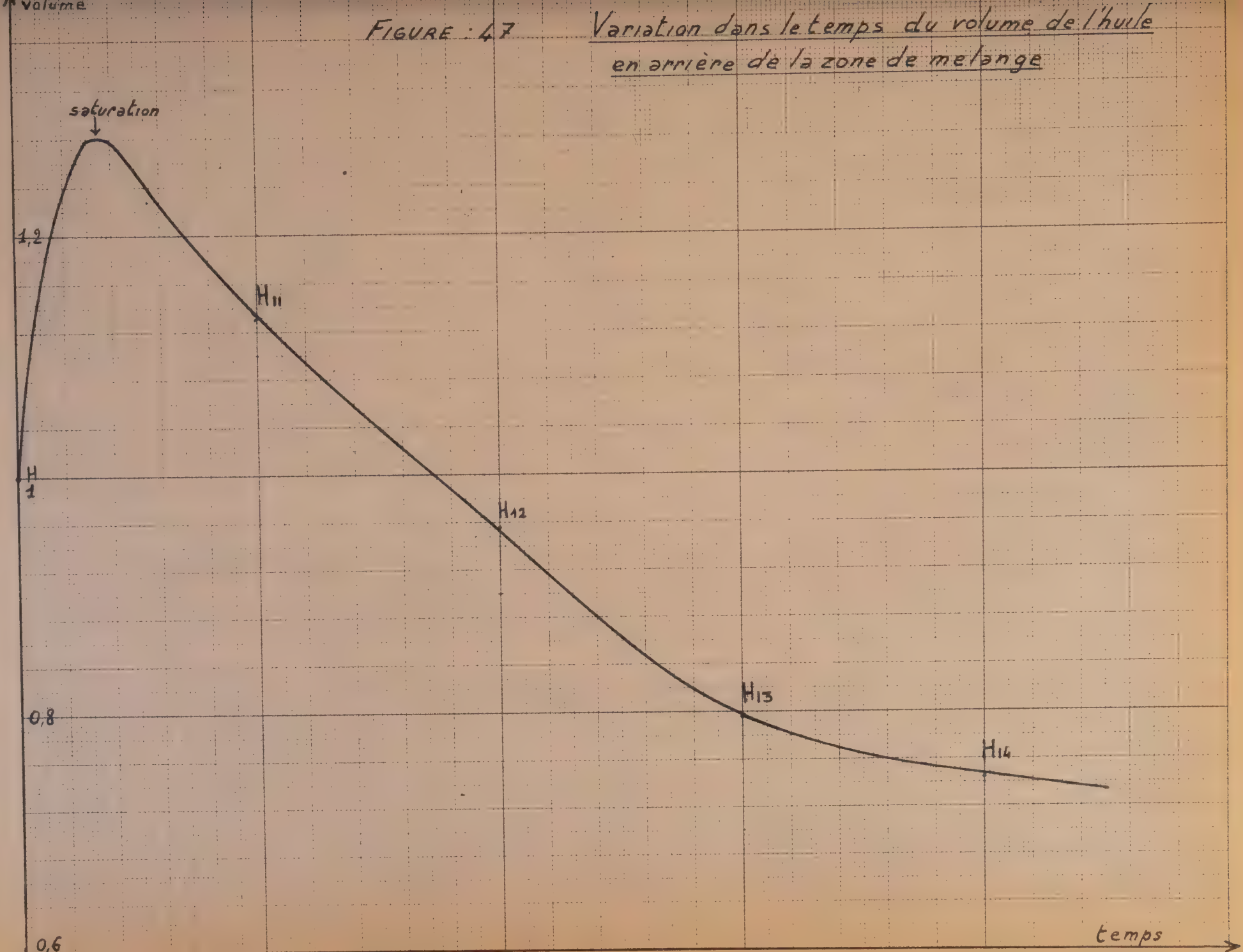


FIGURE : 48 Variation du volume de l'huile de l'arrière à l'avant de la zone de melange

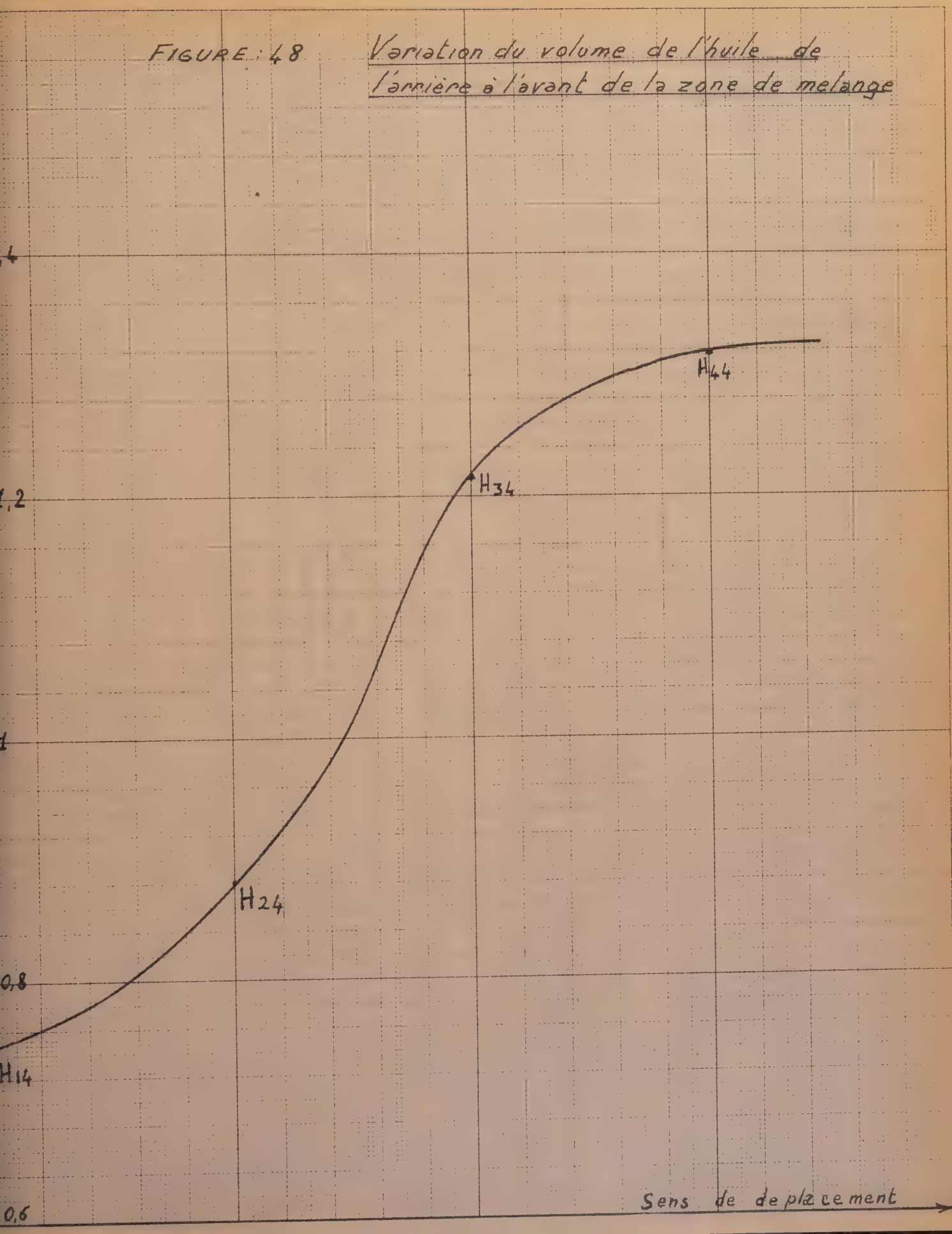
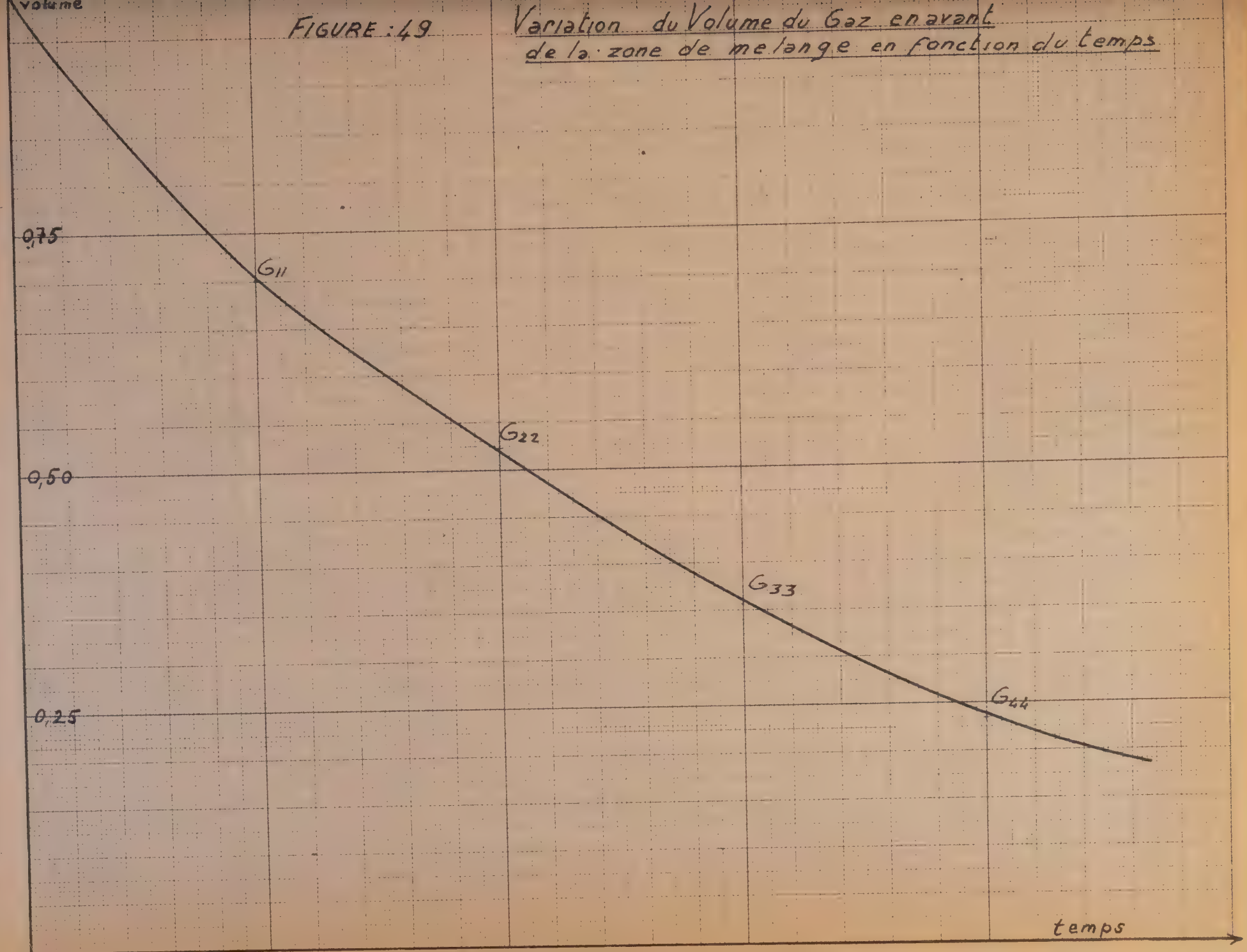


FIGURE : 49

Variation du Volume du Gaz en avant de la zone de melange en fonction du temps



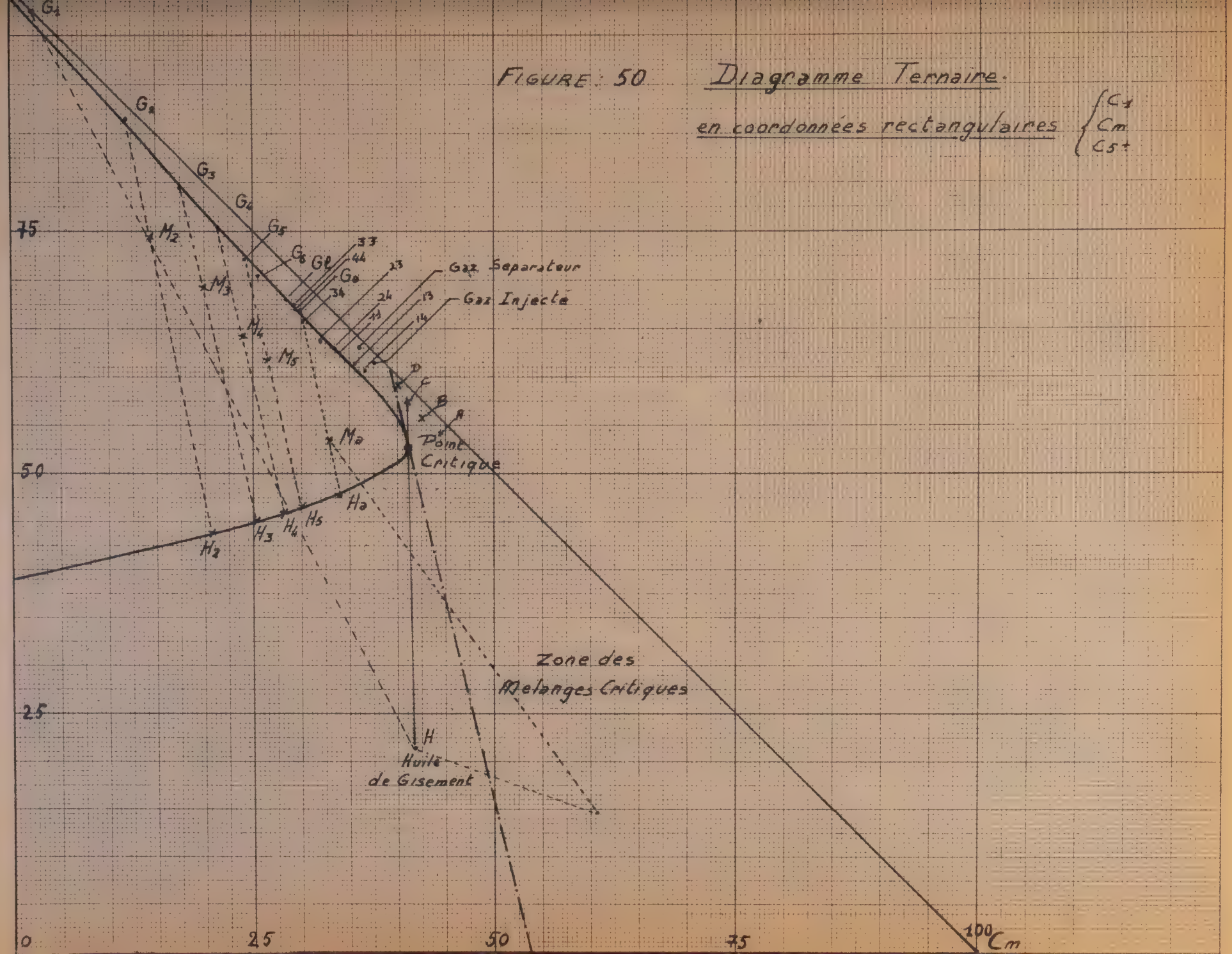


FIGURE : 50
Diagramme Ternaire
en coordonnées rectangulaires
C1
Cm
C5+
G1
G2
G3
G4
G5
G6
G7
G8
M2
M3
M4
M5
M8
H2
H3
H4
H5
H8
33
44
23
34
24
13
11
14
Gaz Separateur
Gaz Injecté
D
C
B
A
Point Critique
Zone des Melanges Critiques
H
Huile de Gisement
75
50
25
0
25
50
75
100
Cm

Diagramme Ternaire

FIGURE 51

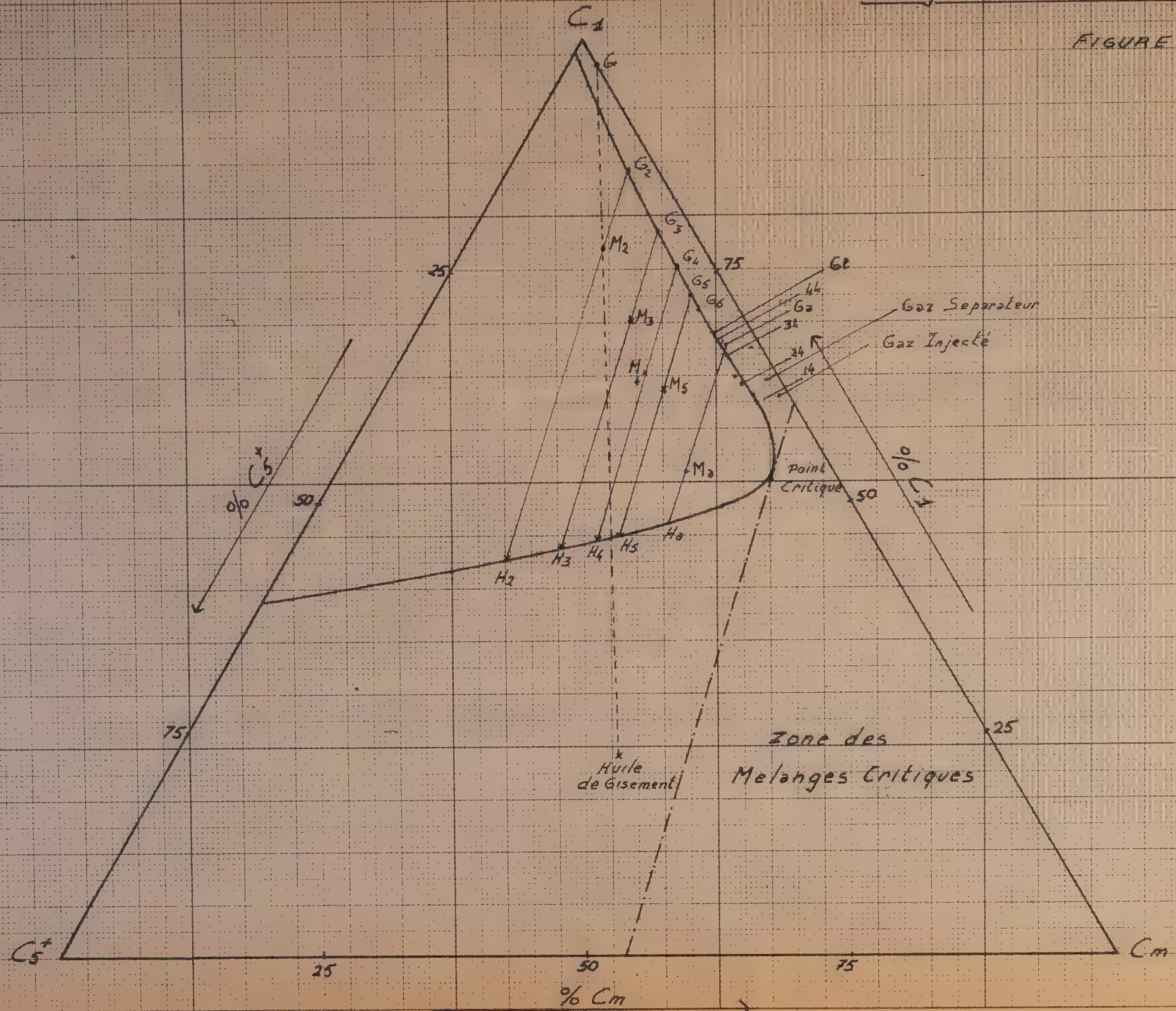
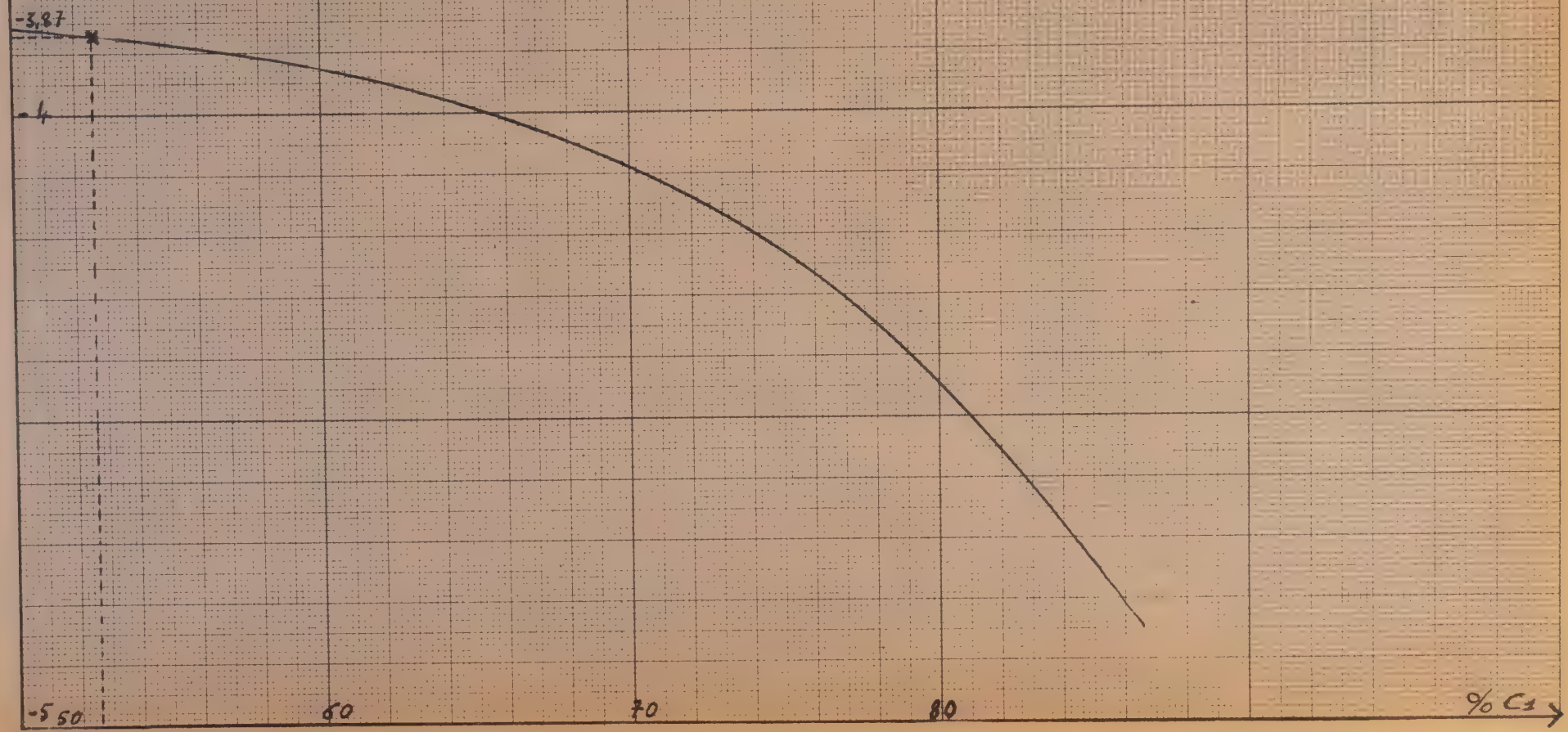


FIGURE : 52 Pente des droites de raccordement en fonction du % de C_1



DEUXIEME THESE

DETERMINATION DES SURFACES SPECIFIQUES DE SOLIDES POREUX PAR DES METHODES CHROMATOGRAPHIQUES

Vu et permis d'imprimer
MONTPELLIER, le

Le Recteur de l'Académie
DE MONTPELLIER,

Vu et approuvé
MONTPELLIER, le

Le Doyen de la Faculté
des Sciences,